

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАБИЧ БОГДАН БОРИСОВИЧ

УДК 535.015, 621.391.6

ДИСЕРТАЦІЯ
ОПТИЧНО СЕЛЕКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ НА ОСНОВІ
НАНОКОМПОЗИТНИХ СТРУКТУР

153 – Мікро- та наносистемна техніка (Автоматизація та приладобудування)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



Бабич Б. Б.

Науковий керівник: Мачулянський Олександр Вікторович, доктор технічних наук,
доцент

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Бабич Б. Б. Оптично селективні елементи на основі нанокомпозитних структур. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 – Мікро- та наносистемна техніка (Автоматизація та приладобудування) – виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти та науки України, Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена розробці оптично селективних елементів з заданими спектральними характеристиками на основі нанокомпозитних структур з врахуванням особливостей мікроструктури та оптичних характеристик нанорозмірних компонент. У роботі проведено комплексні дослідження спектральних залежностей оптичних параметрів нанорозмірних компонент та композитних структур на їх основі.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі досліджень, визначено наукову новизну, показано практичне значення отриманих результатів, вказаний зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Представлено інформацію про апробацію та публікацію результатів досліджень за темою дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану розробки, досліджень, застосування оптично селективних елементів, показано наявність ряду проблем:

- не вивчений аспект впливу мікроструктури нанорозмірних компонент композитних структур на їх оптичні параметри;
- не досліджено вплив на спектральні характеристики проміжних нанорозмірних композитних шарів, які виникають при формуванні шаруватих оптично селективних структур;
- необхідність дослідження електромагнітного відгуку нанорозмірних компонент на електромагнітний вплив для достовірного прогнозування оптичних характеристик оптично селективних елементів, які формуються на їх основі;

- відсутність достовірних обчислювальних алгоритмів оцінки оптичних параметрів нанокompозитних структур;
- розробка та проектування найбільш прийнятних для масового промислового виробництва оптично селективних елементів.

На основі аналізу вказаних проблем поставлено мету та завдання дисертаційних досліджень.

У другому розділі проаналізовано переваги розрахунку оптичних характеристик шаруватих структур матричним методом послідовного нарощування шарів, представлені основні співвідношення та обмеження його застосування.

Показано, що точна спектрофотометрична система рівнянь феноменологічної теорії в випадку нанорозмірних плівок є математично некоректною. В якості регуляризаційного обчислювального методу її розв'язку використано метод безперервного диференціального спуску.

Запропоновано обчислювальний алгоритм на основі матричного методу послідовного нарощування шарів для розробки оптично селективних елементів у вигляді багат шарових покриттів та визначення оптичних параметрів нанорозмірних шарів багат шарової структури за відомими параметрами відгуку структури на електромагнітний вплив.

Третій розділ присвячено дослідженню нанорозмірних шарів срібла на підкладках SiO_2 , виготовлених методом вакуумного осадження. Встановлено особливості їх спектральних залежностей коефіцієнтів пропускання та відбивання в інтервалі $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм. Визначено значення оптичних параметрів нанорозмірних шарів металів на основі результатів спектрофотометричних досліджень експериментальних зразків.

Встановлено апроксимаційні співвідношення дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності нанорозмірних плівок срібла з товщинами від 1 до 35 нм в спектральному діапазоні довжин хвиль $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм, які застосовано в якості вхідних даних рефлекторних шарів срібла при моделюванні оптично селективних елементів.

У четвертому розділі визначено значення ефективної комплексної діелектричної проникності нанокomпозитних шарів з діелектричною компонентою (Al_2O_3 , SiO_2 , Cr_2O_3) та металевою нанорозмірною фазою хрому в спектральному діапазоні $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм з врахуванням оптичних параметрів їх компонент.

Встановлено особливості спектральної зміни дійсної та уявної частини комплексної ефективної діелектричної проникності досліджуваних нанокomпозитів зі значеннями фактору заповнення металевої фази хрому від 0,15 до 0,54, що враховано при розробці оптично селективних елементів.

Встановлено апроксимаційні залежності комплексної ефективної діелектричної проникності нанорозмірних композитних шарів $\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$, Cr/SiO_2 , $\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ в спектральному діапазоні $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм, які використано для моделювання та дослідження впливу композитних нанорозмірних шарів на спектральні характеристики оптично селективних елементів.

П'ятий розділ присвячено визначенню спектральних характеристик коефіцієнтів відбивання та пропускання елементів на основі рефлекторних шарів срібла, міді та досліджених нанокomпозитів. Досліджено залежності коефіцієнтів пропускання та відбивання селективних елементів від структурних параметрів композитних шарів на основі нанорозмірних включень хрому. Показано спектральне зміщення значень критичної довжини хвилі електромагнітного випромінювання на 0,4 мкм при зміні структурних параметрів нанорозмірних компонент, що дозволяє керувати профілем спектральної залежності оптично селективних елементів.

Запропоновано оптично селективні елементи, прозорі у видимому діапазоні спектру, які відрізняються від відомих аналогів тим, що замість багатошарових діелектричних структур, використано металодіелектричний композит.

Наведено основні інтегральні параметри запропонованих оптично селективних елементів. Надано рекомендації щодо їх використання в якості енергоефективних елементів. Запропоновано критерії ефективності оптичних елементів на основі нанокomпозитних структур з енергозберігаючими

властивостями, що дозволяє проводити оптимізацію їх спектральних характеристик на забезпечення максимальної ефективності з точки зору енергозбереження.

Вказано перспективи застосування сформованих оптично селективних елементів та проведено їх порівняння з існуючими аналогами.

В роботі вперше одержанні наступні результати:

- Визначено оптичні параметри нанорозмірних шарів срібла на основі результатів спектрофотометричних досліджень експериментальних зразків срібла на підкладках SiO_2 , виготовлених методом вакуумного осадження. Встановлено апроксимаційні співвідношення дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності нанорозмірних плівок срібла з товщинами від 1 до 35 нм в спектральному діапазоні довжин хвиль $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм, які застосовано в якості вхідних даних рефлекторних шарів срібла при моделюванні оптично селективних елементів.

- Розраховано значення комплексної ефективної діелектричної проникності нанокompозитних шарів з металевою нанорозмірною фазою хрому при значеннях фактору заповнення $0,15 \div 0,54$ та матеріалів діелектричної компоненти (Al_2O_3 , SiO_2 , Cr_2O_3). Розроблено апроксимаційні співвідношення комплексної ефективної діелектричної проникності нанорозмірних композитних шарів $\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$, Cr/SiO_2 , $\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ в спектральному діапазоні $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм, які необхідні для розрахунку оптично спектральних характеристик при проектуванні селективних елементів на основі нанокompозитних структур.

- Досліджено залежності коефіцієнтів пропускання та відбивання селективних елементів від структурних параметрів композитних шарів на основі нанорозмірних включень хрому. Показано спектральне зміщення значень критичної довжини хвилі електромагнітного випромінювання на 0,4 мкм при зміні структурних параметрів нанорозмірних компонент, що дозволяє керувати профілем спектральної залежності оптично селективних елементів.

- Запропоновано оптично селективні елементи, прозорі у видимому діапазоні спектру, які відрізняються від відомих аналогів тим, що замість

багатошарових діелектричних структур, використано нанокompозит. Показано, що запропоновані елементи на основі таких структур, відзначаються можливістю забезпечення заданої оптичної селективності.

Одержані результати можуть бути використані для вирішення висвітлених в роботі проблем, пов'язаних з розробкою оптично селективних елементів на основі нанокompозитних структур.

Результати дисертаційної роботи використані у навчальному процесі кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», а саме використовуються в лекційних і практичних заняттях з дисциплін «Твердотільна електроніка», «Технологічні основи електроніки», «Технологія напівпровідникових приладів та інтегральних схем», «Елементний і структурний аналіз», а також під час виконання кваліфікаційних робіт студентів кафедри.

Ключові слова: оптична селективність, нанорозмірні шари, енергозберігаючі технології, спектрофотометричні дослідження, оптичні параметри.

ABSTRACT

Babych B. B. Optically selective elements based on nanocomposite structures. – Qualified scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, specialty 153 – Micro- and nanosystem technology (Automation and instrumentation) – completed at the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the development of optically selective elements with given spectral characteristics on the basis of nanocomposite structures taking into account the peculiarities of the microstructure and optical characteristics of nanosized components. The complex researches of spectral dependences of optical parameters of nanosized components and composite structures on their basis are carried out in the work.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the purpose and objectives of research, identifies scientific novelty, shows the practical significance of the results, and indicates the relationship of work with scientific programs, topics. Information on approbation and publication of research results on the topic of the dissertation is presented.

The first chapter analyzes the current state of development, research, application of optically selective elements, shows the presence of a number of problems:

- aspect of the influence of the microstructure of nanosized components of composite structures on their optical parameters has not been studied;
- influence on the spectral characteristics of intermediate nanosized composite layers, which arise during the formation of layered optically selective structures, has not been studied;
- need for study of the electromagnetic response of nanosized components to electromagnetic effects for reliable prediction of the optical characteristics of optically selective elements that are formed on their basis;

- lack of reliable computational algorithms for estimating the optical parameters of nanocomposite structures;
- development and design of the most acceptable for mass industrial production optically selective elements.

Based on the analysis of these problems, the purpose and objectives of dissertation studies are set.

The second chapter analyzes the advantages of calculating the optical characteristics of layered structures by the matrix method of sequential building of layers, presents the basis of ratio and limitations of its application.

It is shown that the exact spectrophotometric system of equations of phenomenological theory in the case of nanosized films is mathematically incorrect. The method of continuous differential descent is used as a regularization computational method of its solution.

A computational algorithm based on the matrix method of sequential building of layers for the development of optically selective elements in the form of multilayer coatings and determination of optical parameters of nanosized layers of multilayer structure by known parameters of structure response to electromagnetic influence is proposed.

The third chapter is devoted to the study of nanosized layers of silver on SiO₂ substrates manufactured by vacuum deposition. The peculiarities of their spectral dependences of transmission and reflection coefficients in the interval $\lambda = 0.3 \div 2 \mu\text{m}$ are established. The values of optical parameters of nanosized metal layers are determined on the basis of the results of spectrophotometric studies of experimental samples.

Approximation dependences of real and imaginary parts of complex dielectric constant of nanosized silver films with thicknesses from 1 to 35 nm in the spectral wavelength range $\lambda = 0.3 \div 2 \mu\text{m}$ are established, which are used as input data of reflective layers of silver in modeling of optically selective elements.

In the fourth chapter, the values of effective complex dielectric constant of nanocomposite layers with dielectric component (Al₂O₃, SiO₂, Cr₂O₃) and metal

nanosized chromium phase in the spectral range $\lambda = 0.3 \div 2 \mu\text{m}$ are determined taking into account the optical parameters of their components.

The peculiarities of spectral change of real and imaginary part of the complex effective dielectric constant of investigated nanocomposites with values of filling factor of metal phase of chromium from 0.15 to 0.54 are established, which is taken into account during development of optically selective elements.

Approximation dependences of complex effective dielectric constant of nanosized composite layers Cr/Al₂O₃, Cr/SiO₂, Cr/Cr₂O₃ in the spectral range $\lambda = 0.3 \div 2 \mu\text{m}$ are established, which are used for modeling and research of influence of composite nanosized layers on spectral characteristics of optically selective elements.

The fifth chapter is devoted to the determination of the spectral characteristics of the reflection and transmission coefficients of elements based on the reflex layer (Ag, Cu) and the studied nanocomposites. The dependences of the transmission and reflection coefficients of selective elements on the structural parameters of composite layers based on nanosized chromium inclusions have been studied. The spectral shift of the values of the critical wavelength of electromagnetic radiation by 0.4 μm when changing the structural parameters of nanosized components is shown, which allows to control the profile of the spectral dependence of optically selective elements.

Optically selective elements transparent in the visible range of the spectrum which differ from the known analogues in that instead of multilayer dielectric structures is used metal-dielectric composite are proposed.

The main integral parameters of the proposed optically selective elements are presented. Recommendations for their use as energy efficient elements are given. Criteria for the efficiency of optical elements based on nanocomposite structures with energy-saving properties are proposed, which allows to optimize their spectral characteristics to ensure maximum efficiency in terms of energy saving.

Prospects of application of the formed optically selective elements are specified and their comparison with existing analogues is carried out.

In the work for the first time the following results were obtained:

– The optical parameters of nanosized silver layers were determined on the basis of the results of spectrophotometric studies of experimental silver samples on SiO_2 substrates manufactured by vacuum deposition. Approximation dependences of real and imaginary parts of complex dielectric constant of nanosized silver films with thicknesses from 1 to 35 nm in the spectral wavelength range $\lambda = 0.3 \div 2 \mu\text{m}$ are established, which are used as input data of reflective layers of silver in modeling of optically selective elements.

– The values of complex effective dielectric constant of nanocomposite layers with metal nanosized chromium phase at values of filling factor $0.15 \div 0.54$ and materials of dielectric component (Al_2O_3 , SiO_2 , Cr_2O_3) are determined. Approximation dependences of complex effective dielectric constant of nanosized composite layers $\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$, Cr/SiO_2 , $\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ in the spectral range $\lambda = 0.3 \div 2 \mu\text{m}$ are developed, which are necessary for calculation of optical spectral characteristics in the designing selective elements based on nanocomposite structures.

– The dependences of the transmission and reflection coefficients of selective elements on the structural parameters of composite layers based on nanosized chromium inclusions have been studied. The spectral shift of the values of the critical wavelength of electromagnetic radiation by $0.4 \mu\text{m}$ when changing the structural parameters of nanosized components is shown, which allows to control the profile of the spectral dependence of optically selective elements.

– Optically selective elements transparent in the visible range of the spectrum which differ from the known analogues in that instead of multilayer dielectric structures is used metal-dielectric composite are proposed. It is shown that the proposed elements on the basis of such structures are marked by the possibility of providing a given optical selectivity.

The obtained results can be used to solve the problems covered in the work related to the development of optically selective elements based on nanocomposite structures.

Results of dissertation work are used in the educational process of the Microelectronics department of the National Technical University of Ukraine "Igor

Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", namely used in lectures and practical classes in the disciplines "Solid state electronics", "Technology of semiconductor devices and integrated circuits", "Elemental and structural analysis", as well as during the qualification works of students of the department.

Keywords: optical selectivity, nanosized layers, energy-saving technologies, spectrophotometric studies, optical parameters.

Список опублікованих праць за темою дисертації:

1. Machulianskyi, Oleksandr, **Bohdan Babych**, and Viktor Machulianskyi. "Determination of the efficiency factors of the absorption and scattering of nickel nanoparticles." *Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska* 8.1 (2018): 4-7.
(INDEX COPERNICUS, GOOGLE SCHOLAR, опубліковано у періодичному науковому виданні іншої держави, що входить до Організації економічного співробітництва та розвитку та Європейського Союзу)
(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)
2. Мачулянський, О. В., **Б. Б. Бабич**, В. О. Мачулянський, та Н. П. Тарасовська. "Моделювання наноструктурних металодіелектричних систем для використання в якості оптичних фільтрів." *Вісник Херсонського національного технічного університету* 1.3(58) (2016): 371-375.
(ФАХОВЕ ВИДАННЯ, НАЦІОНАЛЬНА БІБЛІОТЕКА ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО, GOOGLE SCHOLAR, РИНЦ)
(Особистий внесок здобувача: розроблено алгоритм розрахунку)
3. Мачулянський, А. В., **Б. Б. Бабыч**, и В. А. Мачулянський. "Математическое моделирование многофункциональных покрытий." *Вісник Херсонського національного технічного університету* 1.3(62) (2017): 192-196.
(ФАХОВЕ ВИДАННЯ, НАЦІОНАЛЬНА БІБЛІОТЕКА ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО, GOOGLE SCHOLAR, РИНЦ)
(Особистий внесок здобувача: проведено розрахунок параметрів просвітлюючих покриттів)
4. Machulianskyi, O. V., **B. B. Babych**, and V. O. Machulianskyi. "Modeling of an electromagnetic response of single-layer nanocomposite coatings." *Visnyk of Kherson National Technical University* 1.3(66) (2018): 104-108.
(ФАХОВЕ ВИДАННЯ, НАЦІОНАЛЬНА БІБЛІОТЕКА ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО, GOOGLE SCHOLAR, РИНЦ)

(Особистий внесок здобувача: проведено числове моделювання спектрів відбивання та пропускання композитів та аналіз отриманих результатів)

5. Machulianskyi, O. V., **B. B. Babych**, and V. O. Machulianskyi. "Approximation models of functional systems with nanocomposite components." *Visnyk of Kherson National Technical University* 3.2(69) (2019): 145-150.

(ФАХОВЕ ВИДАННЯ, НАЦІОНАЛЬНА БІБЛІОТЕКА ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО, GOOGLE SCHOLAR, РИНЦ)

(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)

6. Machulansky, A., and **B. Babych**. "Selective energy-saving metal-dielectric nanocomposite coatings based on copper." *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка* 1/2.21/22 (2014): 74-78.

(ФАХОВЕ ВИДАННЯ, GOOGLE SCHOLAR)

(Особистий внесок здобувача: розрахунок параметрів теплових фільтрів в інфрачервоному діапазоні)

7. Machulansky, A., and **B. Babych**. "Dielectric-metal composites with dispersed inclusions of cooper for microwave range devices." *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка* 1.23 (2015): 55-57.

(ФАХОВЕ ВИДАННЯ, GOOGLE SCHOLAR)

(Особистий внесок здобувача: проведено числове моделювання ефективної діелектричної проникності нанокомпозитних матеріалів)

8. Machulianskyi, O., **B. Babych**, and V. Machulianskyi. "Optical filters on the basis of composite nanodimensional structures." *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка* 1.25 (2017): 34-37.

(ФАХОВЕ ВИДАННЯ, GOOGLE SCHOLAR)

(Особистий внесок здобувача: розрахунок параметрів теплових фільтрів в інфрачервоному діапазоні)

9. Borisova, A., A. Machulyansky, M. Rodionov, Y. Yakimenko, and **B. Babych**. *Properties of aluminum oxynitride films prepared by reactive magnetron sputtering*, Proceedings of the IEEE 34th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 16-19 April 2014.
(SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
(Особистий внесок здобувача: дослідження оптичних властивостей діелектричних плівок)
10. Borisova, A., A. Machulyansky, M. Rodionov, V. Verbitskiy, Y. Yakimenko, and **B. Babych**. *Energy-efficient optically transparent coating based on a metal-dielectric composites*, Proceedings of the IEEE 35th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 21-24 April 2015.
(SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
(Особистий внесок здобувача: проведено розрахунок параметрів просвітлюючих покриттів)
11. Borisova, A., **B. Babych**, A. Machulyansky, V. Verbitskiy, and Y. Yakimenko. *Dimensional dependencies of optical parameters of nanodimensional metal particles*, Proceedings of the IEEE 36th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 19-21 April 2016.
(SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)
12. **Babych, B.**, A. Borisova, A. Machulyansky, V. Machulyansky, M. Rodionov, and Y. Yakimenko. *Film coatings that are transparent in the visible spectral region with shielding properties in the microwave range*, Proceedings of the IEEE 37th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 18-20 April 2017.
(SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
(Особистий внесок здобувача: проведено розрахунок параметрів просвітлюючих покриттів)

13. **Babych, B.**, O. Borisova, O. Machulianskyi, M. Rodionov, V. Verbitskiy, and V. Machulianskyi; Y. Yakymenko. *Investigation of the structure and optical properties of thin copper films*, Proceedings of the IEEE 38th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 24-26 April 2018.
(SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)
14. **Babych, B.**, O. Borisova, O. Machulianskyi, M. Rodionov, D. Koroliouk, V. Machulianskyi, and Y. Yakymenko. *Applications of metal-dielectric nanocomposite structures in information systems*, Proceedings of the IEEE 38th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 24-26 April 2018.
(SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)
15. **Babych, B.**, Y. Yakymenko, M. Rodionov, O. Machulianskyi, and V. Seker. *Infrared spectra of metal-dielectric nanostructured phosphate class complexes*, Proceedings of the IEEE 39th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 16-18 April 2019.
(SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
(Особистий внесок здобувача: дослідження оптичних властивостей діелектричних плівок)
16. **Babych, B.** *Magnetic Granular Materials*, Innovations in Science and Technology: proceeding of the XI International R&D Students Conference, Kyiv, 28 November 2013.
17. Мачуляньський, О. В., та **Б. Б. Бабич**. *Оптичні характеристики нанодисперсних металодіелектричних плівок*, Матеріали 8-ї науково-практичної конференції "Перспективні напрямки сучасної електроніки", Київ, 14-15 травня 2014 р.

(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)

18. Секер, В. П., и **Б. Б. Бабыч**. *Спектры поглощения и отражения нанокompозитных структур на основе серебра*, Матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених “ЕЛЕКТРОНІКА-2017” (ELCONF), Київ, 25-27 квітня 2017 р.

(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)

19. Machulyansky, A., and **B. Babych**. *Energy-saving nanocomposite coverings on the basis of copper*, Proceedings of the 10th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 22-25 October 2014.

(Особистий внесок здобувача: розрахунок параметрів теплових фільтрів в інфрачервоному діапазоні)

20. Machulyansky, A., and **B. Babych**. *Dielectric-metal composites with dispersed inclusions of copper for microwave applications*, Proceedings of the 11th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 21-24 October 2015.

(Особистий внесок здобувача: розраховано електричні параметри нанокompозитних елементів)

21. Machulyansky, A., **B. Babych**, and V. Machulyansky. *Cutting filters based on composite nanoscale structure*, Proceedings of the 12th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 19-21 October 2016.

(Особистий внесок здобувача: проведено числове моделювання ефективної діелектричної проникності нанокompозитних матеріалів)

22. Machulyansky, A., **B. Babych**, and V. Machulyansky. *Optical filters on the basis of composite systems with nanodimensional inclusions of metals*, Proceedings of the 13th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 24-27 October 2017.

(Особистий внесок здобувача: розрахунок параметрів теплових фільтрів в інфрачервоному діапазоні)

23. Machulianskyi, O., **B. Babych**, and V. Machulianskyi. *Application of evolutionary algorithm for modeling and optimization of selective systems*, Proceedings of the 14th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 23-26 October 2018.
(Особистий внесок здобувача: проведено оптимізацію параметрів селективних елементів та аналіз отриманих результатів)
24. Борисова, О. В., **Б. Б. Бабич**, В. Г. Вербицький, О. В. Мачулянський, и В. О. Смілик. *Енергозберігаючі наноккомпозитні покриття на основі нікелю*, Матеріали 4-ї Міжнародної науково-практичної конференції "Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки", Чернівці, 23-25 жовтня 2014 р.
(Особистий внесок здобувача: розрахунок параметрів теплових фільтрів в інфрачервоному діапазоні)
25. Мачулянський, О. В., **Б. Б. Бабич**, та В. О. Мачулянський. *Електродинамічне моделювання композитів на основі діелектричної матриці з включеннями феромагнітних металів*, Матеріали 5-ї Міжнародної науково-практичної конференції "Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах", Чернівці, 3-5 листопада 2016 р.
(Особистий внесок здобувача: розроблено алгоритм розрахунку)
26. Мачулянський, О. В., **Б. Б. Бабич**, та В. О. Мачулянський. *Визначення факторів ефективності поглинання та розсіювання наночастинок нікелю*, Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції I Міжнародний симпозіум "Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях", Чернівці, 9-11 листопада 2017 р.
(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)
27. Мачулянський, О. В., **Б. Б. Бабич**, та В. О. Мачулянський. *Селективні властивості наноккомпозитних металодіелектричних структур в оптичному діапазоні*, Матеріали VII Міжнародної науково-практичної

конференції "Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах", Чернівці, 8-10 листопада, 2018.

(Особистий внесок здобувача: розраховано електричні параметри нанокompозитних елементів)

28. Мачулянский, А. В., **Б. Б. Бабыч**, и В. А. Мачулянський. *Математическое моделирование многофункциональных покрытий*, Матеріали 18-ї Міжнародної конференції з математичного моделювання, Херсон, 18-22 вересня 2017 р.

(Особистий внесок здобувача: проведено розрахунок параметрів просвітлюючих покриттів)

29. Machulianskyi, O. V., **B. B. Babych**, and V. O. Machulianskyi. *Modeling of an electromagnetic response of single-layer nanocomposite coatings*, Materials of 19th international conference of mathematical modelling is dedicated to 250 anniversary from the birthday Jean-Baptiste Joseph Fourier, Kherson, 17-21 September 2018.

(Особистий внесок здобувача: проведено числове моделювання спектрів відбивання та пропускання композитів та аналіз отриманих результатів)

30. Machulianskyi O. V., **B. B. Babych**, and V. O. Machulianskyi. *Approximation models of functional systems with nanocomposite components*, Materials of 20th international conference of mathematical modelling, Kherson, 16-20 September 2019.

(Особистий внесок здобувача: розраховано електричні параметри нанокompозитних елементів)

31. Machulyansky, A., **B. Babych**, and V. Machulyansky. *Modelling of electromagnetic parameters of two-dimensional nanostructural system taking into account statistics of distribution of nanoparticles on the sizes*, Матеріали 9-ї Міжнародної наукової конференції "Функциональная база наноэлектроники", Одеса, 18-23 вересня 2017.

(Особистий внесок здобувача: розраховано електричні параметри нанокомпозитних елементів)

32. Мачулянський, О. В., **Б. Б. Бабич**, та В. П. Секер. *Просвітлюючі покриття на основі наноструктурних металодіелектричних композитів*, Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції "Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка", Кременчук, 17-19 травня 2018 р.

(Особистий внесок здобувача: проведено розрахунок параметрів просвітлюючих покриттів)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	23
ВСТУП.....	24
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ АСПЕКТІВ ФОРМУВАННЯ ОПТИЧНО СЕЛЕКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	31
1.1. Класифікація оптичних селективних елементів.....	31
1.2. Оптично селективні елементи з енергозберігаючими властивостями.....	37
1.2.1. Види теплових селективних елементів.....	39
1.2.2. Основні оптичні та електрофізичні характеристики.....	42
1.3. Матеріали, конструкції оптичних тонкоплівкових структур.....	49
1.4. Методи визначення оптичних параметрів оптичних селективних елементів.....	52
1.5. Особливості технології формування оптичних тонкоплівкових багат шарових структур.....	54
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ.....	58
РОЗДІЛ 2. СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОРОЗМІРНИХ КОМПОНЕНТ.....	60
2.1. Метод розрахунку оптичних характеристик шаруватих структур.....	60
2.2. Обчислювальний алгоритм на основі послідовного нарощування шарів.....	66
2.3. Визначення оптичних параметрів нанорозмірних шарів.....	67
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	74
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ НАНОРОЗМІРНИХ КОМПОНЕНТІВ СЕЛЕКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	75
3.1. Виготовлення нанорозмірних компонент.....	75
3.2. Методи дослідження.....	77

3.2.1. Спектрофотометричні дослідження компонентів оптично селективних елементів.....	77
3.2.2. Електронно-мікроскопічні дослідження.....	80
3.2.3. Дослідження нанорозмірних діелектричних шарів.....	82
3.3. Результати досліджень оптичних параметрів нанорозмірних компонентів селективних структур.....	83
3.4. Апроксимаційні моделі оптичних характеристик нанорозмірних металевих плівок.....	86
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	88
РОЗДІЛ 4. ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАНОРОЗМІРНИХ КОМПОЗИТНИХ ШАРІВ.....	89
4.1. Результати числового моделювання оптичних параметрів нанорозмірних композитних структур на основі хрому.....	89
4.2. Поглинання та розсіювання електромагнітного випромінювання нанорозмірними компонентами композитних структур.....	95
4.3. Апроксимаційні моделі оптичних параметрів нанорозмірних композитних шарів.....	99
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.....	101
РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ОПТИЧНО СЕЛЕКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ НАНОКОМПОЗИТНИХ СТРУКТУР.....	102
5.1. Моделювання спектральних оптичних характеристик нанокompозитних структур.....	102
5.2. Основні інтегральні параметри селективних елементів.....	109
5.3. Оптимізація оптичних характеристик модельних елементів.....	113
5.4. Перспективи застосування сформованих оптично селективних елементів та порівняння з існуючими аналогами.....	120
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5.....	121
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	122

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	124
ДОДАТКИ	
ДОДАТОК 1. Список публікацій здобувача за темою дисертацій.....	138
ДОДАТОК 2. Відомості про апробацію результатів дисертації.....	144
ДОДАТОК 3. Документи про використання результатів дисертаційної роботи.....	145

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

ЕМ	—	електромагнітний
АР	—	антирефлекторний
KDP	—	дигідроортофосфат калію
LIDT	—	лазерно-індукований поріг пошкодження (англ. laser-induced damage threshold)
λ	—	довжина ЕМ хвилі
T	—	коефіцієнт пропускання
R	—	коефіцієнт відбивання з боку покриття
R'	—	коефіцієнт відбивання з боку підкладки
n	—	показник заломлення
k	—	показник поглинання
β	—	питоме поглинання
$K_{\text{п}}$	—	фактор ефективності поглинання
$K_{\text{р}}$	—	фактор ефективності розсіювання

ВСТУП

Актуальність теми. Стрімкий розвиток сучасних технологій в таких областях науки і техніки як електроніка, інформаційні системи, енергоефективність та енергозбереження неухильно веде до необхідності дослідження і використання функціональних елементів з заданими характеристиками, створених на основі металодіелектричних нанокомпозитних структур. Структури на основі нанокомпозитних матеріалів володіють унікальними електромагнітними та фізико-хімічними властивостями, які обумовлені явищами взаємодії електромагнітного випромінювання з наноструктурним середовищем. На їх основі ґрунтується робота ряду сучасних оптоелектронних приладів, зокрема: смугових фільтрів; оптичних модуляторів та перемикачів; систем передачі, захисту, відображення та зберігання інформації; селективних оптичних фільтрів для використання в енергозберігаючих технологіях; захисних екрануючих і радіопоглинаючих покриттів.

Значний інтерес для прикладних завдань при використанні таких металодіелектричних нанокомпозитних структур представляє можливість регулювання електромагнітних властивостей таких систем шляхом врахування наноструктурних компонент та композитних структур на їх основі. Таким чином, варіюючи склад, морфологію, розміри компонент та їх співвідношення в композитних структурах можна отримати широкий спектр таких металодіелектричних матеріалів з різними електрофізичними властивостями.

Аналіз науково-технічної літератури показав, що існує значна кількість теоретичних робіт, присвячених дослідженню електромагнітних властивостей гетерогенних матеріалів, проте вони не дають можливості достовірно описувати оптичні властивості в широкому діапазоні спектру електромагнітного випромінювання. Також відсутні аналітичні співвідношення для оптичного діапазону спектру, за допомогою яких можна прогнозувати відгук таких структур на зовнішній електромагнітний вплив. Внаслідок чого накопичений досвід досліджень та розробки нанокомпозитних структур має, в основному, емпіричний

характер. Крім того, достовірність наявної експериментальної інформації про дисперсійні та розмірні залежності електромагнітних параметрів нанорозмірних компонент та композитів на їх основі в оптичному діапазоні спектру електромагнітного випромінювання викликає сумніви, оскільки мікроструктуру нанодисперсних систем оцінюються без врахування достовірних розмірних залежностей та неоднорідності структури. Це представляє значний інтерес для фундаментальних досліджень та прикладних застосувань металодіелектричних нанокомпозитних структур, проте має обмежене застосування для практичних технічних рішень, оскільки, на практиці для більшості нанодисперсних систем характерна статистично неоднорідна структура. Тому дослідження та врахування впливу мікроструктури компонент нанодисперсних систем на їх оптичні параметри є актуальним науково-прикладним завданням.

Окрім вищесказаного, дослідження металодіелектричних нанокомпозитних структур обумовлено необхідністю розробки прийнятних для масового виробництва оптичних функціональних елементів. Вирішення цього завдання полягає у зниженні їх вартості (за умови збереження їх ефективності) за рахунок зменшення числа технологічних операцій при виготовленні. Досягнути цього можливо шляхом оптимізації електромагнітних і мікроструктурних параметрів складових компонентів в умовах багатофакторності їх залежностей та вдосконалення технології виготовлення.

Таким чином, вирішення вказаних актуальних науково-прикладних задач обумовили постановку даної дисертаційної роботи, в якій вирішується важливе науково-технічне завдання – неможливість створення функціональних елементів з заданими оптичними характеристиками на основі нанокомпозитних структур без врахування достовірної інформації про електромагнітні та мікроструктурні параметри їх складових компонентів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря

Сікорського». Дослідження виконані за темою дисертаційної роботи проводилися відповідно до основних наукових напрямків кафедри та до державних науково-технічних програм пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки, зокрема в рамках наступних науково-дослідних робіт:

- "Функціональні пристрої на основі композитних наноструктур", державний реєстраційний номер № 0116U008156;
- "Електронні властивості та елементи симетрії нанорозмірних твердих тіл", державний реєстраційний номер № 0118U001522.

Мета і завдання дослідження. *Метою дисертаційної роботи є розробка оптично селективних елементів з заданими спектральними характеристиками на основі нанокомпозитних структур з врахуванням особливостей мікроструктури та оптичних параметрів нанорозмірних компонент.*

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- Провести експериментальні та теоретичні дослідження спектральних залежностей оптичних параметрів наноструктурних компонент композитних матеріалів.
- Розробити обчислювальні алгоритми оцінки оптичних параметрів нанокомпозитних структур.
- Дослідити вплив на спектральні характеристики шаруватих структур проміжних нанокомпозитних шарів.
- Встановити апроксимаційні моделі оптичних параметрів нанорозмірних компонент.
- Розробити оптично селективні елементи на основі нанокомпозитних структур.

Об'єкт дослідження – відгук на дію електромагнітного поля нанокомпозитних структур.

Предмет дослідження – оптично селективні властивості нанокомпозитних структур.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовувалися наступні методи такі як просвічувальна та растрова електронна мікроскопія, оптична спектрофотометрія. Числове моделювання та оптимізація досліджуваних нанокompatитних структур проводились за допомогою сучасних пакетів прикладних програм.

Наукова новизна одержаних результатів. В роботі вперше одержанні наступні результати:

- Визначено оптичні параметри нанорозмірних шарів срібла на основі результатів спектрофотометричних досліджень експериментальних зразків срібла на підкладках SiO_2 , виготовлених методом вакуумного осадження. Встановлено апроксимаційні співвідношення дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності нанорозмірних плівок срібла з товщинами від 1 до 35 нм в спектральному діапазоні довжин хвиль $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм, які застосовано в якості вхідних даних рефлекторних шарів срібла при моделюванні оптично селективних елементів.

- Розраховано значення комплексної ефективної діелектричної проникності нанокompatитних шарів з металевою нанорозмірною фазою хрому при значеннях фактору заповнення $0,15 \div 0,54$ та матеріалів діелектричної компоненти (Al_2O_3 , SiO_2 , Cr_2O_3). Розроблено апроксимаційні співвідношення комплексної ефективної діелектричної проникності нанорозмірних композитних шарів $\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$, Cr/SiO_2 , $\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ в спектральному діапазоні $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм, які необхідні для розрахунку оптично спектральних характеристик при проектуванні селективних елементів на основі нанокompatитних структур.

- Досліджено залежності коефіцієнтів пропускання та відбивання селективних елементів від структурних параметрів композитних шарів на основі нанорозмірних включень хрому. Показано спектральне зміщення значень критичної довжини хвилі електромагнітного випромінювання на 0,4 мкм при зміні структурних параметрів нанорозмірних компонент, що дозволяє керувати профілем спектральної залежності оптично селективних елементів.

– Запропоновано оптично селективні елементи, прозорі у видимому діапазоні спектру, які відрізняються від відомих аналогів тим, що замість багатошарових діелектричних структур, використано нанокмпозит. Показано, що запропоновані елементи на основі таких структур, відзначаються можливістю забезпечення заданої оптичної селективності.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані результати можуть бути використані для вирішення висвітлених в роботі проблем, пов'язаних з розробкою оптично селективних елементів на основі нанокмпозитних структур.

Наукові розробки та результати дисертаційної роботи використані у навчальному процесі кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», а саме використовуються в лекційних і практичних заняттях з дисциплін «Твердотільна електроніка», «Технологічні основи електроніки», «Технологія напівпровідникових приладів та інтегральних схем», «Елементний і структурний аналіз», а також під час виконання кваліфікаційних робіт студентів кафедри.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі узагальнені результати досліджень, виконаних здобувачем особисто та у співавторстві. У спільних публікаціях результатів наукових досліджень автором зроблено наступний внесок:

- розроблено алгоритм розрахунку [2, 25];
- розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів [1, 5, 11, 13, 14, 17, 18, 26];
- проведено числове моделювання ефективної діелектричної проникності нанокмпозитних матеріалів [7, 21];
- проведено оптимізацію параметрів селективних елементів та аналіз отриманих результатів [23];
- розраховано електричні параметри нанокмпозитних елементів [20, 27, 30, 31];

- проведено числове моделювання спектрів відбивання та пропускання композитів та аналіз отриманих результатів [4, 29];
- проведено розрахунок параметрів просвітлюючих покриттів [3, 10, 12, 28, 32];
- дослідження оптичних властивостей діелектричних плівок [9, 15];
- розрахунок параметрів теплових фільтрів в інфрачервоному діапазоні [6, 8, 19, 22, 24].

Основна частина приведених у дисертації результатів доповідалася особисто автором на міжнародних науково-технічних конференціях.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідались та обговорювались на 24 науково-технічних конференціях: XI міжнародній науково-практичній студентській конференції “Innovations in Science and Technology” (м. Київ, 2013 р.); X, XI, XII, XIII, XIV міжнародній науково-технічній конференції “Electronics and applied physics” (м. Київ, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 pp.); 34th, 35th, 36th, 37th, 38th, 39th міжнародній науково-технічній конференції “Electronics and Nanotechnology (ELNANO)” (м. Київ, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 pp.); IV міжнародній науково-технічній конференції “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки” (м. Чернівці, 2014 р.); VIII науково-практичній конференції “Перспективні напрямки сучасної електроніки” (м. Київ, 2014 р.); V міжнародній науково-технічній конференції “Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems” (м. Чернівці, 2016 р.); XVII, XVIII, XIX, XX міжнародній конференції з математичного моделювання (МКММ) (м. Херсон, 2016, 2017, 2018, 2019 pp.); X міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених “ЕЛЕКТРОНІКА-2017” (ELCONF) (м. Київ, 2017 р.); IX міжнародній науковій конференції “Функциональная база нанoeлектроники” (м. Одеса, 2017 р.); VI міжнародній науково-практичній конференції I Міжнародний симпозіум “Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях” (Чернівці, 2017 р.); VII міжнародній науково-практичній конференції “Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в

інфокомунікаційних системах” (Чернівці, 2018 р.); V міжнародній науково-практичній конференції “Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка”, (Кременчук, 2018 р.).

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 32 наукових працях, в тому числі 8 статей надруковано у виданнях, які включені до міжнародних науково-метричних баз: Index Copernicus, Google Scholar (з них 7 статей надруковано в фахових виданнях України та одна стаття у періодичному науковому виданні держави, яка входять до Організації економічного співробітництва та розвитку), а також 24 тезах доповідей та матеріалів конференцій (7 з яких включені до міжнародних науково-метричних баз: Web of Science, Scopus).

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 138 найменувань та 3 додатків. Робота містить 46 рисунків та 7 таблиць. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 147 сторінок тексту.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ АСПЕКТІВ ФОРМУВАННЯ ОПТИЧНО СЕЛЕКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

1.1. Класифікація оптичних селективних елементів

У найширшому розумінні цього терміну оптично селективний елемент або оптичний фільтр – це будь-який пристрій або матеріал, який використовується для зміни спектрального розподілу інтенсивності або стану поляризації електромагнітного випромінювання, що падає на нього. Принцип дії таких елементів може базуватися на багатьох різних фізичних явищах, включаючи поглинання, заломлення, інтерференцію, дифракцію, розсіювання та поляризацію. Реалізуються оптично селективні елементи, в основному, у вигляді тонкоплівкових багатошарових та композитних покриттів. Такі покриття можуть бути створені на основі однорідних або неоднорідних шарів. Можна додатково класифікувати їх на одношарові, структуровані та однорідні багатошарові або складні неоднорідні шаруваті покриття (рис. 1.1.).

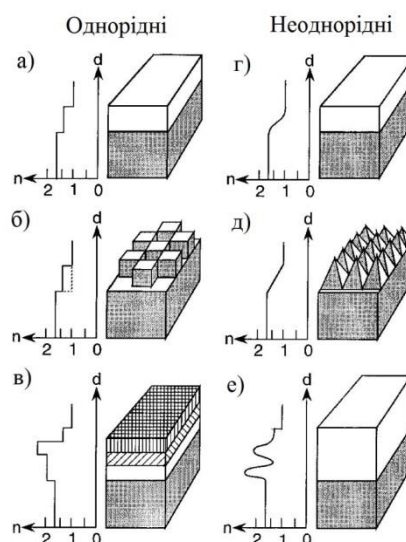


Рис. 1.1. Структура та зміна ефективного показника заломлення по товщині покриття різних типів оптично селективних елементів: однорідні одношарові (а), структуровані (б) та багатошарові (в) покриття; прості (г), структуровані (д) та складні (е) покриття з неоднорідними шарами

Одношарові антирефлекторні покриття (рис. 1.1 а) Теоретично існує можливість отримання нульової відбивної здатності на певній довжині хвилі з використанням одношарових покриттів. Але через відсутність відповідних матеріалів це не можливо реалізувати на практиці. Проте, навіть при наявних матеріалах досягається корисне зниження відбивання в широкій спектральній області для всіх загальновідомих типів скла, причому коефіцієнт відбивання ніколи не піднімається вище коефіцієнта непокритої поверхні (рис. 1.2 крива 8).

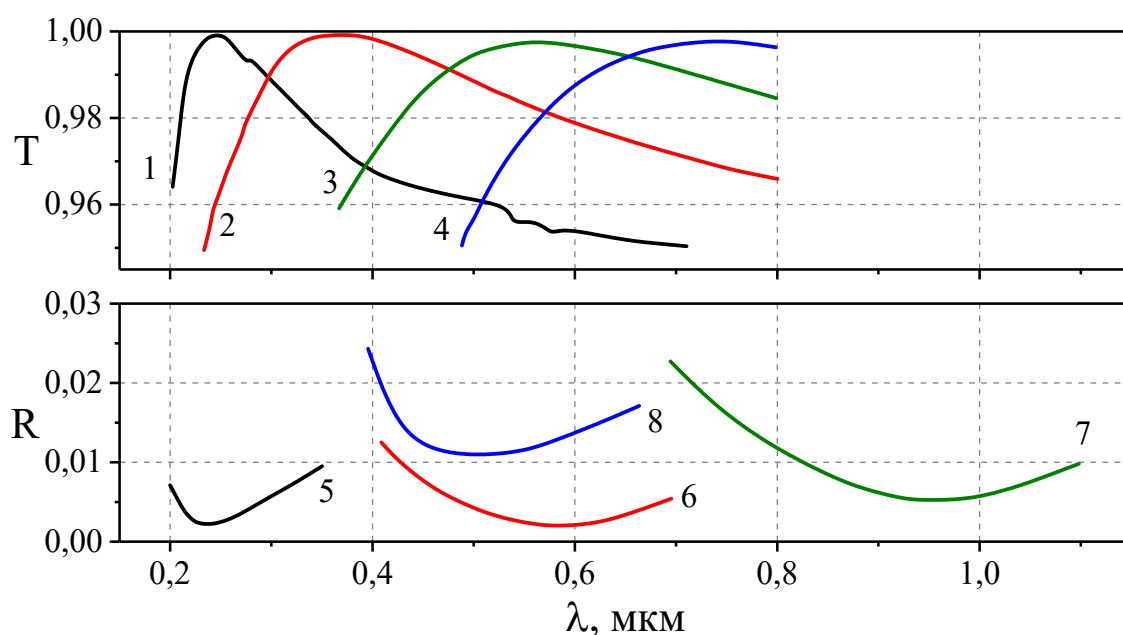


Рис. 1.2. Оптичні характеристики одношарових однорідних АР покриттів на різних підкладках. Пористий діоксид кремнію на плавленому кварці (1 [1], 3 [2], 5 [3]); на SF8 (4 [2]); на склі (6 [3]); на KDP (7 [3]). Пористий MgF_2 на плавленому кварці (2 [1.4 4]). Для порівняння показано звичайне одношарове АР покриття на склі (8 [5])

Покриття з низьким коефіцієнтом заломлення також можуть бути реалізовані осадженням або травленням субхвильових структур (рис. 1.1 б, д). Ефективний показник заломлення залежить від об'ємної частки, яку займають структури [6].

У випадку двох і більше шарів, можна: 1) отримати більшу антирефлекторність в одній конкретній спектральній області; 2) збільшити

ширину спектральної області, в якій коефіцієнт відбивання, як правило, низький; або 3) отримати покриття, в якому низька відбивна здатність однорідна по всьому спектру.

За допомогою діаграми (рис. 1.3) показано, що навіть для двошарового АР покриття існує велика кількість комбінацій показників заломлення, які будуть давати близьку до нульової відбивну здатність на одній довжині хвилі [5].

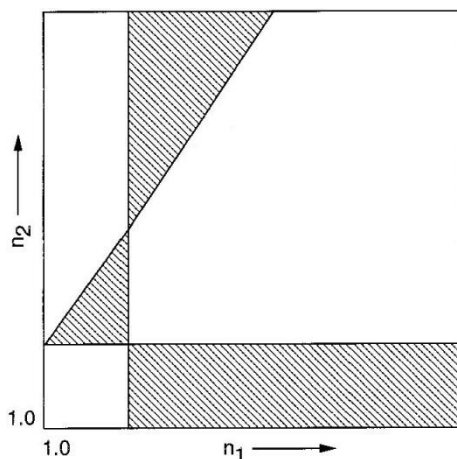


Рис. 1.3. Комбінації показників заломлення (зафарбовані області) двошарових АР покриттів, за допомогою яких можна досягти нульової відбивної здатності на одній довжині хвилі

Металодіелектричні відсікаючі фільтри. Короткохвильові відсікаючі фільтри складаються з непрозорого металевого шару та додаткових шарів. Світло видаляється за рахунок поглинання всередині поглинаючих шарів системи. Товщини окремих шарів підбираються так, щоб максимізувати поглинання та ширину області відсічки. Довгохвильові відсікаючі фільтри складаються з багатоелементних багатошарових відбивачів, нанесених на поглинаюче покриття.

Всі матеріали, що використовуються в багатошарових інтерференційних покриттях, мають краї коротко- та довгохвильового поглинання. Інколи домішка невеликої кількості поглинаючих матеріалів під час формування покриття використовується для налаштування цього краю поглинання. Фільтри не повинні використовуватися на відкритому повітрі, якщо вони не захищені додатково, а також не повинні піддаватися впливу ультрафіолетового випромінювання та/або

високих температур. Найбільшою перевагою відсікаючих фільтрів, що функціонують на основі поглинання в тонких плівках, є їх значно менша кутова залежність.

Зменшення відбиття тонкою металевою плівкою. Тонка металева плівка, нанесена на прозору поверхню, може виступати як дуже ефективне ахроматичне покриття для світла, що падає зі сторони підкладки. Коефіцієнт відбивання світла, що падає з боку повітря, не зменшується, і коефіцієнт пропускання знижується в результаті поглинання всередині плівки. Комбінуючи такі плівки з додатковими шарами, отримують структури різного функціонального призначення.

Чорні поглиначі (рис. 1.4) ефективно поглинають випромінювання, що падає на них в заданій спектральній області. Вони використовуються, наприклад, для управління енергією випромінювання [7], для видалення паразитного світла в оптичних системах, для посилення контрасту в пристроях відображення [8] та для збільшення відношення сигнал/шум в мультиплексорах [9]. Робота чорних поглинаючих покриттів базується на інтерференції в тонких плівках. Зазвичай вони складаються з непрозорого металевого шару і одного або більше діелектричних шарів, перемежованих з частково прозорими металевими шарами. Також можуть бути розроблені покриття такого типу для ультрафіолетових та інфрачервоних спектральних областей.

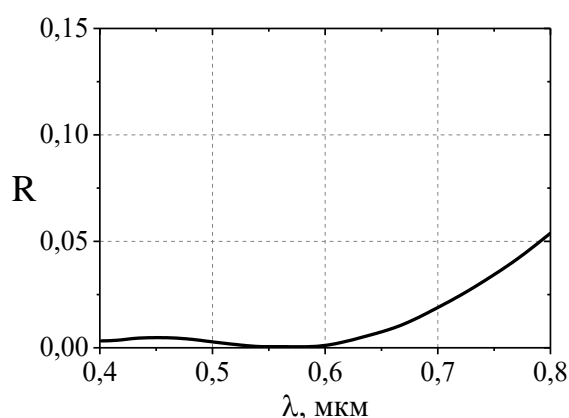


Рис. 1.4. Спектральна залежність коефіцієнта відбивання оптичного елементу типу “чорний поглинач” [5]

Нейтральні атенюатори. Використовуючи поєднання металевих та діелектричних шарів з відповідними оптичними константами і товщинами, можна зменшити відбивання металевої плівки з однієї або обох сторін підкладки [5]. Результати експериментів для одного такого атенюатора наведені на рис. 1.5.

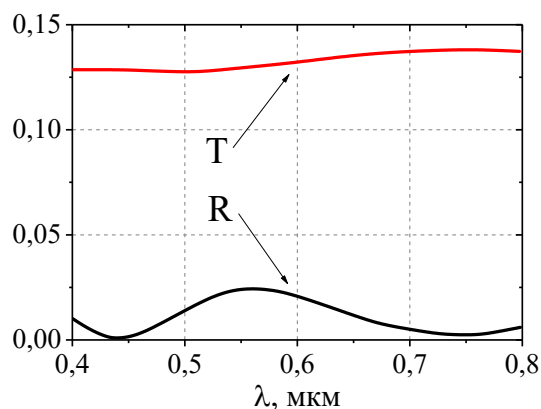


Рис. 1.5. Спектральні залежності коефіцієнтів відбивання R та поглинання T оптичного елементу типу “нейтральний атенюатор”

Використовуючи аналогічний підхід можна зменшити відбивання *вузькосмугових, відсікаючих* та інших типів фільтрів. Експериментальні характеристики [5] смугового та відсікаючого фільтра довгих хвиль наведені на рис. 1.6 а та б відповідно. В обох випадках значення коефіцієнту відбивання було зменшено на порядок, ніж у звичайній конструкції. Однак це відбувається за рахунок коефіцієнта пропускання.

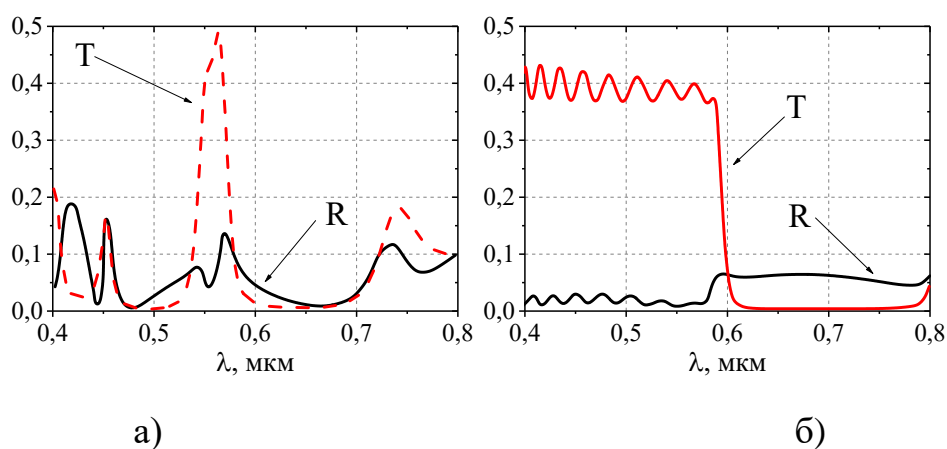


Рис. 1.6. Спектральні залежності коефіцієнтів відбивання R та поглинання T оптичного елементу типу: а) вузькосмуговий фільтр, б) довгохвильовий відсікаючий фільтр

Металеві відбивачі найчастіше виготовляються шляхом вакуумного нанесення матеріалу на відповідну скляну або кварцову підкладку. Срібло має найвищу відбивну здатність у видимій та інфрачервоній області спектру, завдяки чому використовується для інтерферометричних дзеркал та інтерференційних фільтрів. З усіх металів алюміній має найширшу область з високим відбиванням. Якби не абсорбція нижче $\sim 0,2$ мкм внаслідок тонкого оксидного шару, який починає утворюватися через кілька секунд після осадження, його відбивна здатність була б вищою [10].

Найвищі відомі коефіцієнти відбивання в ультрафіолетовій області спектру показані на рис. 1.7.

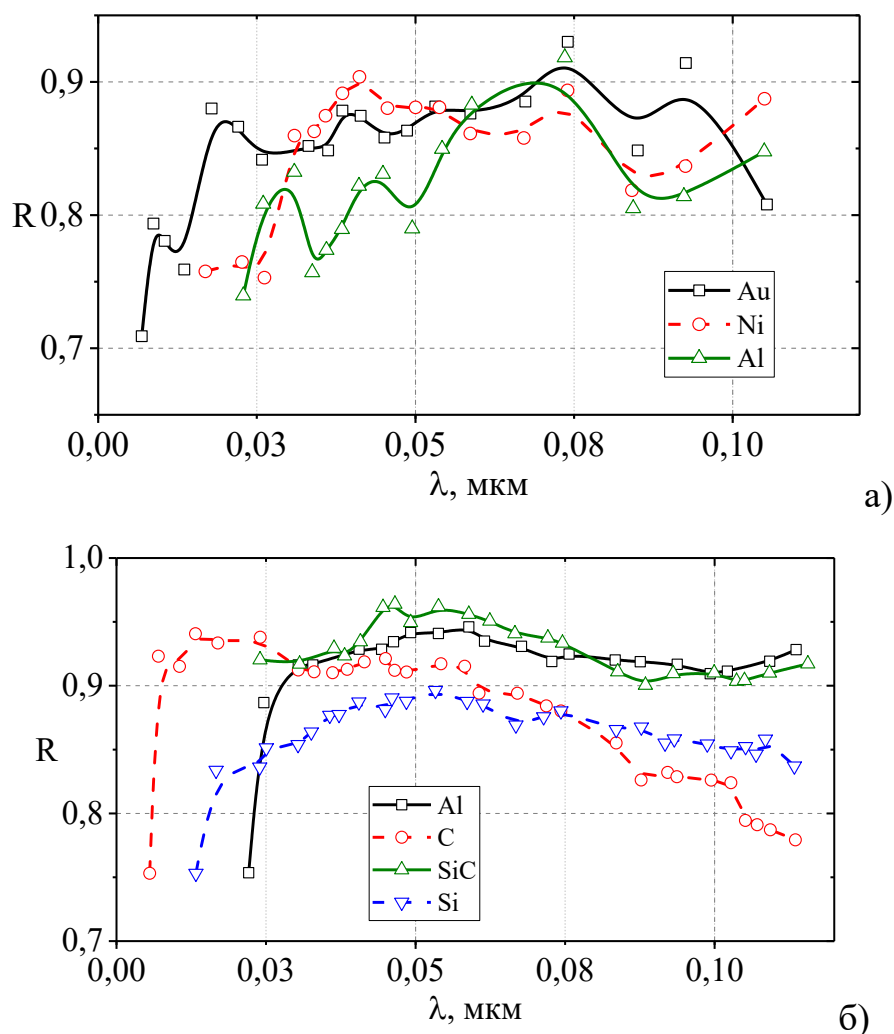


Рис. 1.7. Значення коефіцієнта відбивання в ультрафіолетовій області спектру плівок: а) Ni, Au та Al під кутом падіння 85° [11], б) Al, Si, C та SiC під кутом падіння 89° [12]

При ще менших довжинах хвиль показники заломлення усіх матеріалів стають близькими до одиниці, а коефіцієнти екстинкції прямують до нуля.

Тепловий фільтр – вибірково поглинає або відбиває інфрачервоне випромінювання та пропускає з малими втратами діапазон видимого світла. Як правило формуються як багатошарові структури (до 20 шарів). Застосовуються в освітлювальній апаратурі, в проекторах для захисту плівки, а також при мікрофотографії для захисту біологічних об'єктів від нагрівання. Перспективним напрямком є використання цих фільтрів в енергозберігаючих технологіях.

1.2. Оптично селективні елементи з енергозберігаючими властивостями

В даний час в багатьох розвинених країнах світу для підтримки теплового та світлового комфорту в приміщеннях цивільних будівель використовується застелення зі спеціальними оптичними покриттями, що функціонують як енергетично ефективні прозорі теплові фільтри. Віконне скло з такими покриттями практично зберігає високе значення коефіцієнта пропускання у видимій області спектра звичайного скла (знижуючи його в середньому не більше, ніж на 10%), але в той же час на відміну від звичайного скла відображає (до 90%) інфрачервону радіацію Сонця (рис. 1.8) та предметів.

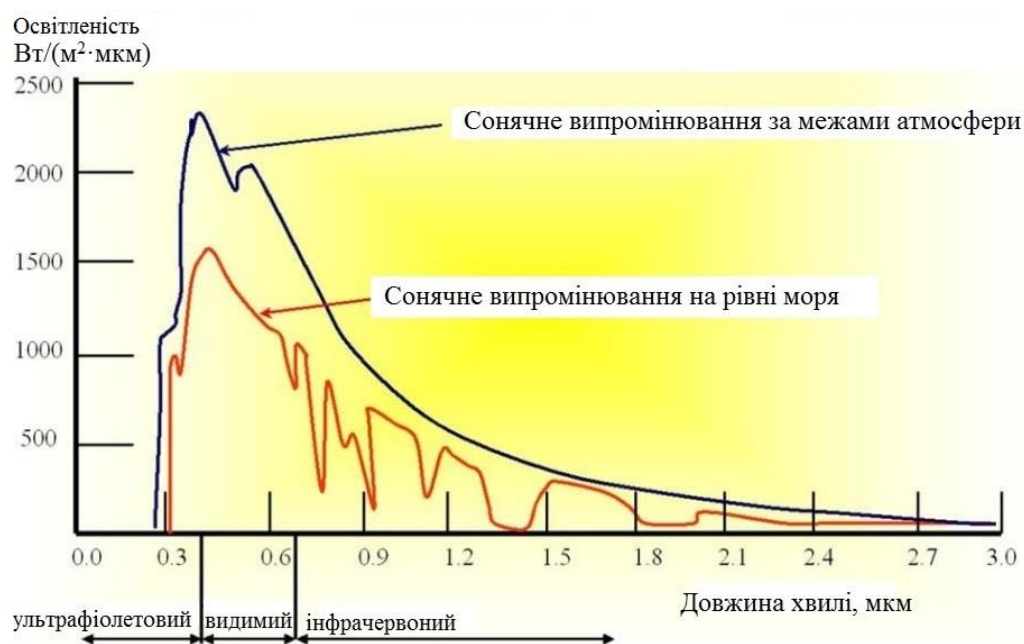


Рис. 1.8. Спектр сонячного випромінювання

Використання таких систем повинно привести до зниження теплових втрат з приміщення в холодний період року, притік тепла в приміщення влітку, і крім того, до раціонального використання сонячної енергії під час опалювального сезону. Поєднання цих функцій можливо тільки із застосуванням спеціальних селективних тепловідбиваючих покриттів, нанесених на прозорі елементи конструкції, зокрема, на віконне листове скло. Спектри пропускання та відбивання скла, представлені на рис. 1.9 а, вказують на те, що віконне скло є селективним поглинаючим фільтром, який має високе пропускання (до 0,9) в діапазоні спектра $\lambda = 0,38 \div 2,5$ мкм (при наявності слабо вираженої смуги поглинання в ближній інфрачервоній області $\lambda = 0,7 \div 2,5$ мкм) та високе поглинання, або випромінювальну здатність в інфрачервоному діапазоні спектру при $\lambda > 3$ мкм, що дозволяє вважати звичайне скло вторинним джерелом теплової радіації взимку в напрямку вулиці, а влітку в напрямку приміщення.

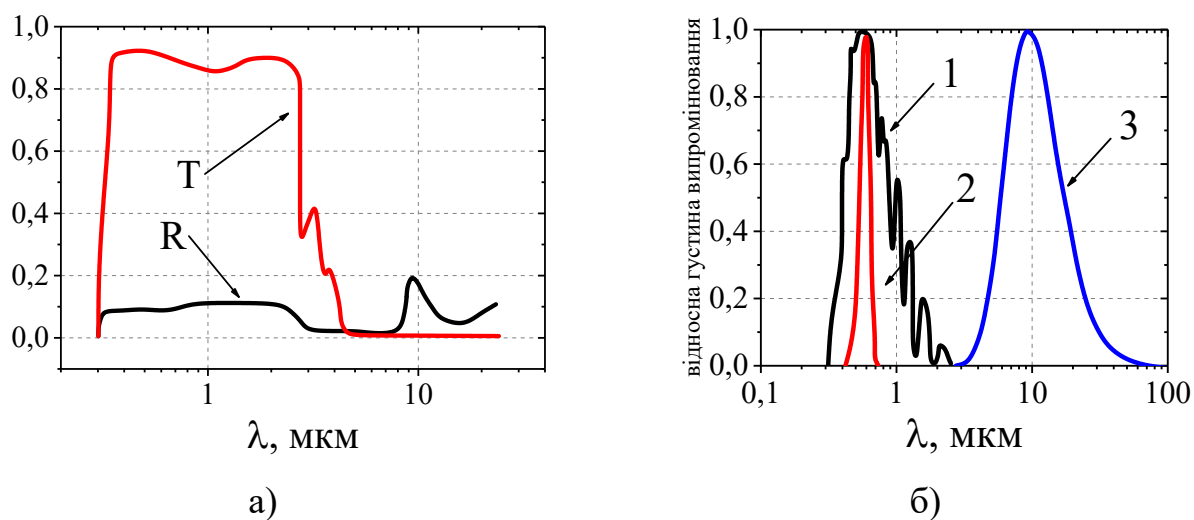


Рис. 1.9. Відносні спектральні характеристики:

а) спектри пропускання T і відбивання R силікатного скла;

б) 1 – випромінювання Сонця на рівні Землі; 2 – чутливість ока стандартного спостерігача; 3 – випромінювання абсолютно чорного тіла ($T = 300$ K)

На рис. 1.9 б представлені спектри відносної густини випромінювання Сонця з температурою ~ 5800 K на рівні Землі та спектр теплового

випромінювання чорного тіла. Теплове випромінювання приміщення кімнати добре апроксимується випромінюванням абсолютно чорного тіла з температурою ~ 300 К. На рис. 1.9 б також представлена відносна спектральна світлова ефективність монохроматичного випромінювання для денного зору. На рис. 1.9 б видно, що загальний спектральний діапазон випромінювання наведених джерел відповідає інтервалу довжин хвиль $\lambda \sim 0,3 \div 25$ мкм, тобто охоплює ультрафіолетову, видиму та середню інфрачервону ділянки спектра. Саме цей діапазон є “робочим” для спектрального селективних тепловідбиваючих покриттів в системі скління. Призначення цих покриттів, які функціонують як теплові дзеркала – спектральне розділення випромінювання високотемпературного джерела (Сонця) і низькотемпературного (житлового приміщення) за принципом спектроділників, коли, зокрема, в приміщення пропускається сонячне високотемпературне випромінювання та відбивається випромінювання низькотемпературного джерела (житлового приміщення). Довжина хвилі $\lambda_{\text{п}}$ на якій відбувається цей розподіл, називається пороговою. Спектральне положення $\lambda_{\text{п}}$ (при якій коефіцієнти T і R рівні), а також величини інтегральних коефіцієнтів пропускання (у видимому діапазоні спектра) і відбивання (інфрачервоному діапазоні) характеризують спектральну селективність покриттів і можуть бути основними критеріями кліматичної класифікації покриттів.

1.2.1. Види теплових селективних елементів

Низькоемісійні покриття

Існує два види низькоемісійних покриттів, які відрізняються один від одного за технологією, складом та характеристикам. Це так звані “тверді” та “м’які” покриття (рис. 1.10).

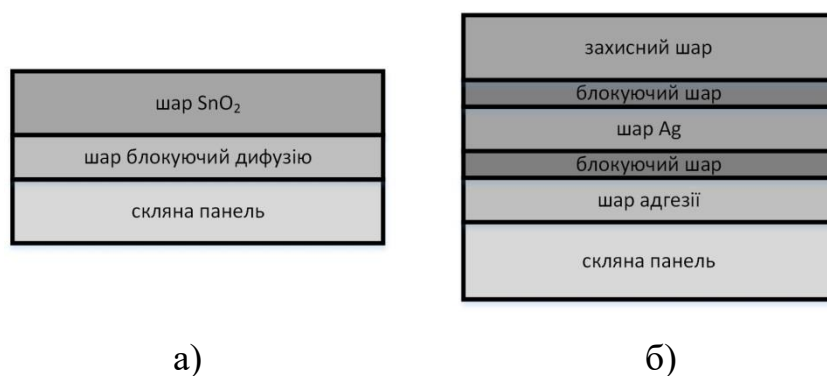


Рис. 1.10. Структура низькоемісійних покриттів: а – твердого, б – м'якого

Перші отримують розкладанням хімічних сполук на ще гарячому склі безпосередньо в процесі його виробництва. Основу покриття становить шар оксиду олова. “Тверді” покриття володіють пропусканням у видимому діапазоні більше 0,8 та коефіцієнтом емісії $0,15 \div 0,4$. До їх переваг потрібно віднести високу адгезію до поверхні скла та стійкість в умовах зберігання і переробки. “М’які” покриття наносять переважно магнетронним розпиленням на холодну поверхню скла. Основу такого покриття складають тонкі шари металів (рис.1.11).

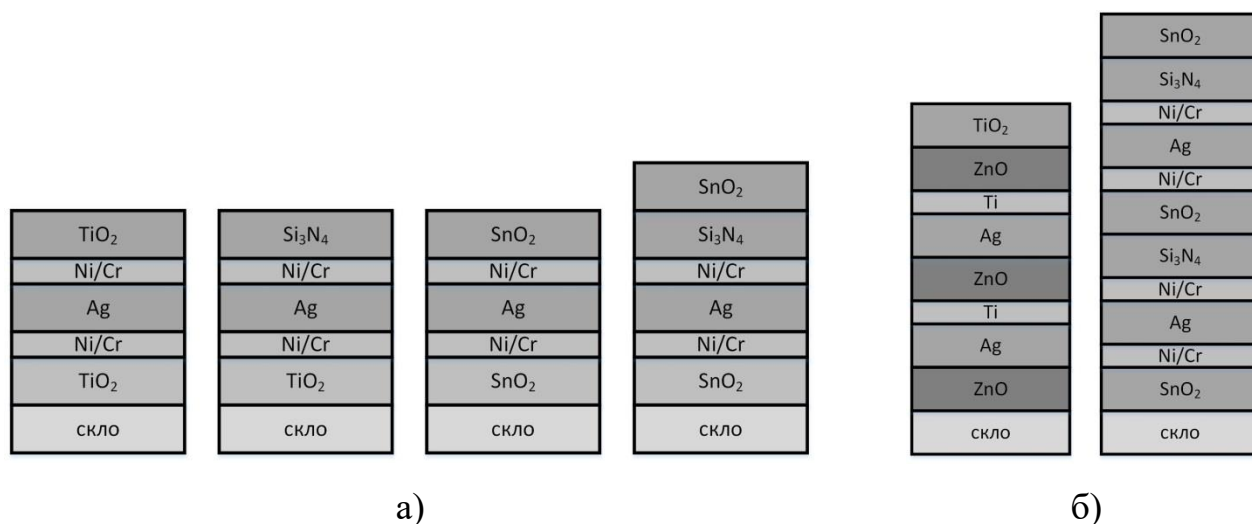


Рис. 1.11. Будова поширених низькоемісійних покриттів: а – з одним шаром срібла; б – з двома шарами срібла

Дані покриття мають пропускання у видимому діапазоні $0,75 \div 0,85$ та коефіцієнт емісії $0,04 \div 0,15$.

З початком появи теплоізолюючого скла терміни тверде і м'яке покриття були призначені, щоб послатися на різну механічну стійкість і, таким чином, різну здатність до переробки скляних полотен з ними. Сьогодні це різниця втратила значення. Стеки покриттів, які використовують Si_3N_4 , надзвичайно корозійно- і зносостійкі, вони мають покращений опір до стирання, вологи, солей та кислот.

Сонцезахисні покриття

Скло з сонцезахисними покриттями зменшує потрапляння сонячного випромінювання в будівлі (рис. 1.12).



Рис. 1.12. Механізми переносу сонячної енергії через скло

Селективні сонцезахисні плівки, крім низького поглинання мають високий коефіцієнт відбивання на ділянці ближнього ІЧ-діапазону через високу концентрацію вільних електродів. Селективні плівки, головним чином, складаються з плівок на основі срібла товщиною 10-25 нм. Срібна плівка вбудована в систему з плівок матеріалів з низькопоглинаючими властивостями, наприклад, оксиди олова, вісмуту, цинку або титану, і металеві плівки, наприклад, на основі металів 8-ї групи періодичної системи Менделєєва (рис. 1.13).

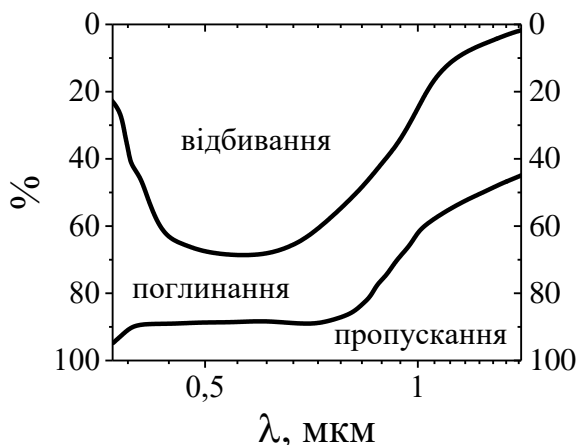


Рис. 1.13. Спектри сонцезахисного скла на основі системи з срібною плівкою

Нанесення неселективних та селективних сонцезахисних покриттів на основі металевих плівок, здійснюється методом магнетронного розпилення. В меншій мірі ці плівки також можна наносити термічним методом. Всі селективні сонцезахисні системи плівок – це так звані м'які покриття.

1.2.2. Основні оптичні та електрофізичні характеристики

Існує багато різних способів опису характеристик оптичних покриттів і фільтрів. Наприклад, фільтри пропускання та відбивання, що призначені для візуальних застосувань, адекватно описуються лише кольором або посиленням на одну з кількох існуючих кольорових систем. Існують також інші спеціалізовані специфікації фільтрів для конкретних застосувань. Однак найповніша інформація про ефективність оптичного елементу надається спектральними кривими коефіцієнтів відбивання, пропускання, поглинання та оптичної густини.

Оптичні властивості

Як показано на рис. 1.14, при довжині хвилі λ спектральний коефіцієнт пропускання фільтра $T(\lambda)$, розміщеного між двома напівнескінченими середовищами, дорівнює відношенню інтенсивності світла цієї довжини хвилі $I_T(\lambda)$, що передається фільтром, до падаючої на нього $I_0(\lambda)$,

$$T(\lambda) = \frac{I_T(\lambda)}{I_0(\lambda)}. \quad (1.1)$$

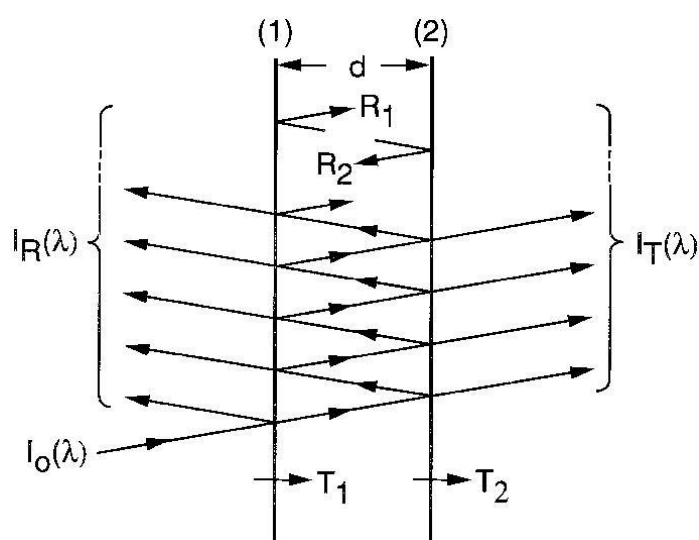


Рис. 1.14. Пропускання та відбивання світла плоско-паралельною пластиною

Спектральний коефіцієнт відбивання $R(\lambda)$ фільтра визначається аналогічно,

$$R(\lambda) = \frac{I_R(\lambda)}{I_0(\lambda)}. \quad (1.2)$$

Залежність між коефіцієнтом пропускання $T(\lambda)$ та щільністю фільтра $D(\lambda)$, яку іноді називають також поглинанням, визначається як

$$D(\lambda) = \log \frac{1}{T(\lambda)}. \quad (1.3)$$

Пропускання, відбивання та поглинання. Найбільш часто використовуваним приладом для вимірювання оптичних характеристик тонкоплівкових покриттів є спектрофотометр. Дисперсія довжин хвиль в промислових приладах для спектрального діапазону від 0,185 до 8 мкм зазвичай забезпечується призмами, лінійчатими або голографічними решітками. Спектрометри перетворення Фур'є здатні до вимірювань приблизно від 2 до 500 мкм. Для вимірювання відбивної здатності доступні різноманітні пристосування. Абсолютні вимірювання T і R з точністю до 0,1 відсотка утруднені навіть у видимій частині електромагнітного спектру. Дуже малі поглинання одиничних шарів зазвичай вимірюють за допомогою калориметрів [13]. Втрати високоефективних лазерних рефlectorів отримують за вимірюваннями часу загасання порожнин інтерферометрів Фабрі-Перо, утворених з цих дзеркал [14].

Шорсткість підкладки та нерівності, що трапляються у межах окремих плівок та границь шарів, призводять до розсіювання світла у всіх напрямках [15-17]. В більшості випадків важливо мінімізувати цей розкид. Для вимірювання кутової зміни розсіювання світла використовуються спеціальні прилади, які називаються скаттерометрами. Такі дані надають інформацію про підкладку та багатошаровість.

На пропускання, відбивання та поглинання деяких оптичних покриттів здійснює вплив атомарний кисень, а також електронне, протонне і ультрафіолетове опромінення. Вони також критично залежать від чистоти вимірюваних компонентів. Забруднення оптичних компонентів також може відбуватися і у космосі [18, 19].

Оптичні константи. Істотно важливе значення має достовірне знання оптичних констант всіх матеріалів, використовуваних при виготовленні оптичних багатошарових покриттів. Існує багато різних методів їх визначення [20, 21]. До них відносяться методи, засновані на рефрактометрії, фотометричних та спектрофотометричних вимірах R та/або T , поляриметрії, однохвильовій або спектроскопічній еліпсометрії, різних інтерферометричних методах, ослабленому повному відбиванні або на комбінації двох або більше цих методів. Деякі з них підходять для вимірювань об'ємних матеріалів, і результати справедливі лише для плівок, одержаних в результаті високоенергетичних процесів осадження. Оптичні константи пористих плівок повинні вимірюватися безпосередньо. Вони залежатимуть від параметрів осадження і від товщини шару та можуть значно відрізнятися від параметрів об'ємних матеріалів [22-24]. Для визначення оптичних констант у рентгенівських та субміліметрових областях слід застосовувати спеціальні методи. Точне вимірювання дуже малих залишкових коефіцієнтів загасання покриттів з прозорих матеріалів є ускладненим. Зазвичай це передбачає використання лазерної калориметрії або використання плівки в якості розділюючого шару в смугових фільтрах. Також дуже важливо мати можливість окремо вимірювати товщину плівки.

Механічні та термічні властивості покриттів

Для кожного виду покриттів у нормативно-технічних документах приводяться характеристики термічних властивостей, механічної міцності й вологостійкості. Ці характеристики враховують при виборі покриття й визначення його функціональної придатності до конкретних умов експлуатації деталі.

По механічній міцності всі покриття розділені на п'ять груп:

- особливо міцні, допускається протирання тканиною із застосуванням розчинників і без них у польових умовах;
- міцні, допускається чищення ватою або серветкою із застосуванням органічних розчинників;

- середньої міцності, вимагають обережності при чищенні ватою або серветкою із застосуванням органічних розчинників;
- неміцні, що не допускають механічного чищення;
- механічно й хімічно неміцні, вимагають обов'язкового захисту після нанесення.

Механічна міцність деяких інтерференційних покриттів кількісно визначається здатністю поверхні обертової деталі пручатися стиранню від тиску гумового наконечника, обтягнутого міткалевою тканиною.

Вологостійкість покриттів оцінюється здатністю плівки витримувати без ушкоджень і зміни оптичних властивостей вплив протягом 10 діб вологої атмосфери (95-98 % відносної вологості при температурі $+40\pm 2$ °C), а також стійкістю до плямування при потраплянні на поверхню крапель прісної й морської води.

Термічна міцність визначається максимальною температурою, при якій плівка не втрачає своїх властивостей, а також здатністю витримувати термоудар при перепаді температур від -60 до +60 °C.

Оптичні багатошарові покриття часто експлуатуються в суворих механічних та екологічних умовах. Ряд стандартів стосується якості підкладки та покриття, адгезії покриттів, їх стійкості до стирання, твердості та стійкості до вологості та ін. Залежно від застосування може знадобитися багатошарове покриття, що відповідає одному або декільком з цих стандартів.

Мірою здатності оптичного компонента витримувати високі випромінювання є його лазерно-індукований поріг пошкодження LIDT (англ. laser-induced damage threshold) [25]. Існує кілька способів визначення цієї величини. Один з часто використовуваних способів визначення базується на графіку виживання відсотка компонентів, які пошкоджуються під час різних лазерних впливів. Величина флуенса, що відповідає перетину середньої кривої через експериментальні точки з ординатою, номінально визначається як LIDT. Таким чином, це максимальний вплив, при якому не очікується пошкодження компонента. Зазвичай повідомляється про нахил кривої виживання. Методи визначення LIDT відрізняються за способом спостереження за пошкодженням

компонента. Це може бути, наприклад, спостереження катастрофічного руйнування за допомогою мікроскопа Номарського, або виявлення заданої зміни розсіювання, або релаксація матеріалу, яка спостерігається за допомогою методу фототермічного відхилення, або робочий критерій, де в заданих межах елемент більше не може виконувати функцію, для якої він був розроблений [5].

Поглинання є основною причиною пошкодження. Падаюче випромінювання, яке поглинається в оптичному елементі, зазвичай перетворюється в тепло в процесі ушкодження [26]. Якщо теплопровідність оптичного компонента занадто низька, температура на елементі буде локально підвищуватися до значення, при якому відбувається пошкодження. Тому пошкодження буде залежати від теплопровідності матеріалів, з яких виготовлений елемент. Наприклад, деякі дзеркала з високою відбивною здатністю, що складаються з покриттів на підкладках Si, SiC, W або Cu, охолоджуються водою під час використання для збільшення відведення тепла.

Теплопровідність тонких плівок на кілька порядків менше теплопровідності відповідних масивних матеріалів. Це ускладнює проблему. Для збільшення LIDT способи осадження оптимізовані для отримання однорідних тонких плівок з низьким поглинанням та з більшою об'ємною теплопровідністю.

Пошкоджень внаслідок поглинання зазвичай виникають на дефектах та інших недосконалоостях. Що стосується підкладки, то вони можуть виникати на поверхні або під її поверхнею, навіть коли матеріал підкладки не є поглинаючим. Дуже важливо уникати матеріалів з кольоровими центрами, пошкодженнями поверхні та включеннями. Поверхня підкладки повинна бути дуже гладкою і не містити подряпин, згустків та пір, інакше туди можуть потрапити поліруючі з'єднання та інші забруднюючі речовини. Перед нанесенням покриття необхідно, щоб підкладка була максимально чистою. Електричні поля, пов'язані з цими недосконалоостями, можуть збільшувати поглинання на величину, пропорційну показником заломлення матеріалу.

Вплив поверхневих відбивань на продуктивність оптичних елементів

У роботі [5] показано, що відбивна здатність поверхні розділу між двома неабсорбуючими середовищами з показниками заломлення n_1 і n_2 визначається як

$$R = \left[\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right]^2. \quad (1.4)$$

В свою чергу, вираз для сумарного пропускання T_0 неабсорбуючої плоско-паралельної пластини, що враховує ефект безлічі внутрішніх відбивань всередині пластини, має вигляд:

$$T_0 = \frac{1 - R}{1 + R}. \quad (1.5)$$

З цього світла лише частина $(1 - R)^2$ проходить через пластину без будь-яких відбивань. Представляє інтерес вираз пропускання для ряду таких пластин, розміщених послідовно. Це допомагає пояснити вплив множинних відбивань між різними пластинами на характеристики пристроїв, таких як потрійні скла та фотооб'єктиви. Загальний коефіцієнт пропускання $T_{\text{заг}}$ з m пластин, розміщених послідовно, задається як

$$T_{\text{заг}} = \frac{T_0}{m - T_0(m - 1)}. \quad (1.6)$$

Кількість світла, що пропускається безпосередньо (прямо) $T_{\text{пр}}$ становить

$$T_{\text{пр}} = (1 - R)^{2m}. \quad (1.7)$$

Світло $T_{\text{відб}}$, яке піддається множинним відбиванням перед передачею, відповідає за хибні зображення та паразитне світло в площині зображення, визначається як

$$T_{\text{відб}} = T_{\text{заг}} - T_{\text{пр}}. \quad (1.8)$$

Зміна $T_{\text{пр}}$ і $T_{\text{відб}}$ від R для декількох значень m показана на рис. 1.15. Показники заломлення матеріалу пластини, нанесені на графік щодо верхньої осі x , припускають, що пластини знаходяться в повітрі.

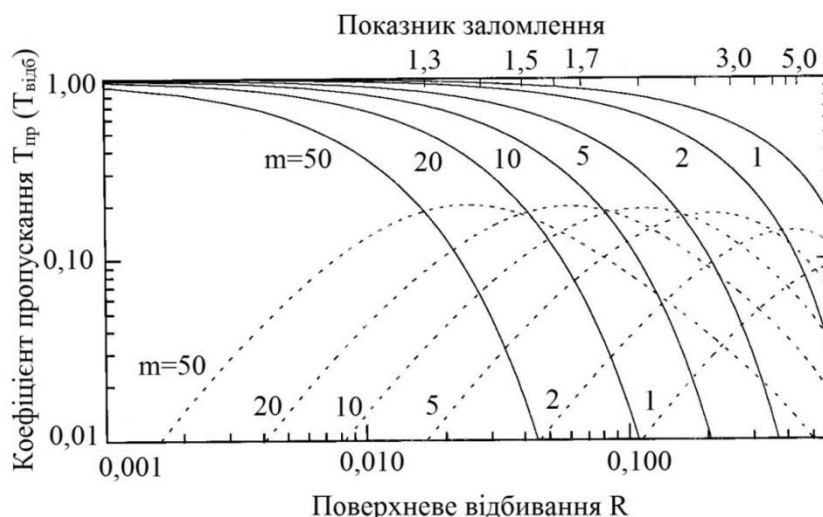


Рис. 1.15. Коефіцієнт пропускання системи з m паралельних пластин в залежності від поверхневого відбивання R [27]:

суцільні лінії – безпосередньо пропущене випромінювання $T_{\text{пр}}$;

штрихові лінії – випромінювання, яке піддається множинним відбиванням перед передачею $T_{\text{відб}}$

Видно, що навіть для відносно невеликого числа пластин з низьким показником заломлення відношення $T_{\text{відб}}/T_{\text{пр}}$ стає значним. Це означає, що в системі формування зображення за несприятливих умов розсіяне світло може повністю затьмарити зображення. По-друге, навіть в оптичних системах, що не створюють зображення, втрата світла $(1 - T_{\text{пр}} - T_{\text{відб}})$ може стати досить непомірною.

Обидві ці проблеми можна вирішити за рахунок зменшення відбивання від поверхні шляхом нанесення відповідних антирефлекторних АР покриттів на межі пластин [28]. Оскільки не можливо сконструювати антирефлекторне покриття з нульовою відбивної здатністю по всьому спектру, спектральна відбивна здатність $R(\lambda)$ зазвичай вибирається таким чином, щоб мінімізувати інтеграл

$$\int_{\lambda} R(\lambda) I(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (1.9)$$

де $I(\lambda)$ і $S(\lambda)$ – розподіл спектральної інтенсивності падаючого випромінювання та спектральна чутливість детектора відповідно. Таким чином, низька відбивна

здатність необхідна лише в спектральній області, в якій добуток $I(\lambda)S(\lambda)$ є значимим. Тут варто підкреслити, що окрім цієї вимоги для більшості застосувань антирефлекторні покриття повинні бути механічно міцними, витримувати різкі кліматичні та теплові зміни, а також повинні відповідати звичайним процедурам очищення [29, 30].

1.3. Матеріали, конструкції оптичних тонкоплівкових структур

Для виготовлення оптичних тонкоплівкових багатошарових структур використовувались багато різних матеріалів. Нижче наведені деякі сполуки, що використовуються для осадження неабсорбуючих шарів в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній частинах спектру: кріоліт (1,35), LiF (1,37), MgF₂ (1,39), ThF₄ (1,52), CeF₃ (1,62), PbF₂ (1,73), ZnS (2,3), ZnSe (2,55), Si (3,5), Ge (4,2), Te (4,8), PbTe (5,5), SiO₂ (1,48), Al₂O₃ (1,6), MgO (1,72), Y₂O₃ (1,82), Sc₂O₃ (1,86), SiO (1,95), HfO₂ (1,98), ZrO₂ (2,1), CeO₂ (2,2), Nb₂O₅ (2,2), Ta₂O₅ (2,1), TiO₂ (2,45). Числа в дужках представляють приблизні показники заломлення в середніх точках діапазону прозорості матеріалу. Деякі метали, що використовуються в одному діапазоні довжин хвиль для осадження відбиваючих або поглинаючих шарів: Ag (0,12 – i3,45), Al (1,02 – i6,85), Au (0,31 – i2,88), Cu (0,83 – i2,6), Ni (1,8 – i3,33), Cr (3,18 – i4,41), інконель (2,94 – i2,92) та Rb (2 – i5,11). Комплексні показники заломлення металів, наведені в дужках, відповідають довжині хвилі 0,56 мкм. Основними вимогами до металевих плівок є високий коефіцієнт відбивання в певному спектральному діапазоні, максимальна стійкість до дії зовнішнього середовища та висока механічна стійкість.

Варто відмітити залежність експлуатаційних властивостей багатошарових структур від матеріалів, що використовуються для їх створення. Наприклад, шари з оксидів, як правило, твердіші, ніж з фторидів, сульфідів або напівпровідників. Тому їх доречніше використовувати на відкритих поверхнях. Напівпровідникових матеріалів слід уникати в елементах, які повинні експлуатуватися в широкому діапазоні температур, оскільки їх оптичні константи можуть істотно змінюватися. Деякі метали м'які та легко пошкоджуються, а інші тьмяніють при впливі

атмосфери. Такі покриття вимагають додаткових захисних покриттів. Інші матеріали вимагають попереднього покриття адгезійними шарами для забезпечення надійного з'єднання з підкладкою. Наприклад, часто шар адгезиву Ni наносять на скло перед нанесенням покриття з Au.

Залежно від конструкції багатошарового покриття і діапазону довжин хвиль, для його роботи вибираються покриття з різними матеріалами. Оскільки ці покриття створюються методами напilenня, то важливо, щоб якість оптичних плівкових матеріалів задовольняло ряду важливих критеріїв:

- прозорість;
- оптимальний показник заломлення;
- оптична однорідність;
- відносна густина;
- високі адгезія та твердість, низькі механічні напруги;
- відповідні до експлуатації хімічні властивості (розчинність, реактивність);
- стабільність поведінки в умовах середовища експлуатації.

Прозорість. Світлові втрати в плівках повинні бути мінімальні, що особливо важливо при створенні багатошарових оптичних покриттів з різних матеріалів. Зазвичай вважається, що повні втрати в багатошарових системах – це сума втрат на розсіювання і поглинання. Який з цих факторів є домінуючим, багато в чому залежить від конкретної ситуації. Втрати, пов'язані з розсіюванням, зменшуються технологічно при отриманні плівок максимально оптично однорідних, що не містять на поверхні та в об'ємі пір, тріщин, бульбашок та інших подібних дефектів. Втрати, зумовлені справжнім, властивим даному матеріалу, поглинанням, можуть бути зменшені тільки правильним підбором матеріалу до довжини хвилі. З огляду на дисперсію показника поглинання обраного матеріалу, використовується область дисперсії досить далека від краю поглинання матеріалу. Щоб світлові втрати в багатошарових оптичних покриттях залишалися незначними, вони повинні бути менше 0,01%.

Показник заломлення діелектричних і напівпровідникових плівок залежить від декількох факторів:

– *від природи матеріалу* або, точніше, від типу хімічного зв'язку в матеріалі. Зазвичай показник заломлення зростає зі збільшенням атомної ваги елемента; наприклад, для вуглецю $n = 2,38$, для Si $n = 3,4$, для Ge $n = 4,0$ (на $\lambda = 4$ мкм). Для плівок TiO_2 характерна сильна залежність n від температури підкладки, що визначає структуру плівок. Так, в інтервалі від 20 до 400 °C плівки можуть бути або аморфні, або зі структурою анатазу або рутилу, або представляти суміш аморфної та кристалічної фаз. При такому показник заломлення на довжині хвилі 550 нм може змінюватися в межах $1,9 \div 2,6$.

Розглянемо діелектричні матеріали, які використовуються для створення багатошарових структур та інтерференційної оптики, а також їх властивості.

Оксиди володіють високою механічною міцністю і хімічною стабільністю. Показники заломлення оксидів перекривають широкий діапазон. Для покриттів з низьким показником заломлення використовують плівки SiO_2 і Si_2O_3 . Проміжні значення показників заломлення мають плівки SiO , Al_2O_3 , MgO , ThO_2 , ZrO_2 та рідкоземельні оксиди. CeO_2 і TiO_2 мають високі показники заломлення.

Плівки SiO_2 найкраще отримувати електронно-променевим способом. При цьому для отримання щільних і стабільних плівок підкладку необхідно нагрівати до 150 °C. Плівки SiO_2 отримують також реактивним випаровуванням SiO в іонізованому кисні. Плівки SiO_2 прозорі в області $0,2 \div 1,1$ мкм, $n = 1,46$ при $\lambda = 550$ нм. Плівки, осаджені на гарячі підкладки, мають високу відносну щільність, хорошу адгезію та дуже високу хімічну і механічну стабільність.

Плівки Al_2O_3 отримують електронно-променевого випаровуванням. Плівки аморфні та мають дуже високу твердість і адгезію. Показник заломлення плівок $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 1,6$ в видимому діапазоні.

Плівки TiO_2 тверді, мають високу адгезію та хімічну стійкість. Високоякісні плівки TiO_2 можна отримати лише методом реактивного випаровування TiO. Плівки прозорі у видимій та ближній ІЧ-областях. Товсті плівки TiO_2 виявляють розсіювання світла в ІЧ-діапазоні поблизу ~ 3 мкм, що обмежує їх застосування в

цьому діапазоні. Показник заломлення плівок TiO_2 дуже сильно залежить від температури підкладки (при зміні температури спостерігається перехід від аморфних плівок до плівок зі структурою анатазу або рутилу), а також від умов напилення: швидкості конденсації і тиску залишкової атмосфери. Тому значення показника заломлення TiO_2 коливається від 1,9 до 2,6. В плівках TiO_2 , отриманих реактивним випаровуванням в іонізованому кисні, спостерігалися високі розтягувальні напруження ($3600 \div 2200 \text{ кГ/см}^2$ в залежності від товщини плівки). Плівки TiO_2 застосовуються в багатошарових структурах зазвичай в комбінації з SiO_2 .

1.4. Методи визначення оптичних параметрів оптичних селективних елементів

Інтерференційні явища, що мають місце при проходженні електромагнітного випромінювання через послідовний ряд підібраних відповідним чином шарів, приводять до зміни його коефіцієнтів відбивання та пропускання для різних довжин хвиль випромінювання.

Зазвичай при розрахунку багатошарових інтерференційних систем вирішують дві основні задачі. Перша задача – визначення спектральних характеристик ЕМ відгуку багатошарової системи, по заданій кількості числа шарів, їх показників заломлення та товщинах. Друга задача – по заданій спектральній залежності коефіцієнта пропускання та відбивання, визначають структурні параметри системи, а саме: число шарів, їх товщини, показники заломлення та поглинання.

Відомо різні методи розрахунку властивостей тонкоплівкових структур, проте всі вони фактично пов'язані один з одним [31, 32].

Серед аналітичних методів варто виділити наступні. *Метод векторного додавання амплітуд* – доволі простий, наглядно пояснює принцип дії просвітлюючого покриття, однак, зі збільшенням числа шарів та різниці між їх показниками заломлення точність методу падає [33]. В свою чергу, *методи, що*

базуються на явищі оптичного адмітансу, позбавлені такого обмеження, проте використовуються лише у тих випадках, коли необхідно обчислити величини інтенсивностей [34]. Метод еквівалентних шарів дозволяє вирішувати певні завдання за умови відомих властивостей періодичних багат шарових систем [35]. Однак на практиці аналітичні методи застосовуються лише для тих завдань, в яких вихідними даними є спектральні характеристики системи [36].

Чисельні методи розрахунку багат шарових систем є найбільш поширеними. Вони можуть застосовуватися до систем складної конфігурації [37-39]. Основу даних методів складає *матрична теорія оптичних систем* [40]. Матричні методи широко використовуються для проектування та аналізу періодичних багат шарових структур [41-43]. Такий підхід поєднує в собі як інструменти розрахунку, так і оптимізації багат шарових тонкоплівкових систем [44, 45]. Комбінація аналітичних та числових методів дозволяє розв'язувати складні завдання розробки багат шарових інтерференційних структур.

Вибір матеріалу підкладки

Важливим етапом проектування тонкоплівкових структур є вибір матеріалу підкладки. Дуже часто це є компромісом між оптичними і механічними характеристиками, адже підкладка повинна витримувати перебування у вакуумі при підвищеній температурі, витримувати очищення в тліючому розряді, мати характеристику пропускання, яка б сприяла отриманню потрібної характеристики фільтра, бути сумісною з матеріалом покриття, бути оптично однорідною і допускати оптичне полірування, а також витримувати ті ж умови експлуатації, що і весь оптичний елемент [44].

Деякі найбільш використовувані матеріали для підкладок наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Матеріали підкладок

Матеріал підкладки	Показник заломлення
Синтетичний кварц	1,45
NaCl	1,5
Скло	1,52
Сапфір	1,7
TiO ₂	2,25
GaAs	3,3
Кремній	3,45
Германій	4,0

Багатошарові покриття наносяться на прозору або частково прозору підкладку. І багатошаровість, і підкладка вносять вклад у загальну ефективність фільтра. Наприклад, поглинання в підкладці часто використовується для обмеження діапазону пропускання фільтра. Також потрібно враховувати відбивання на інтерфейсах (границях шарів) багатошарової структури. Однак його можна зменшити за допомогою антирефлекторних покриттів. Варто зазначити, що показник заломлення є єдиною характеристикою підкладки, яка безпосередньо фігурує в розрахунках тонкоплівкових багатошарових покриттів [31].

1.5. Особливості технології формування оптичних тонкоплівкових багатошарових структур

Існує багато різних методів осадження тонких плівок [46, 47]. Деякі з найбільш поширених процесів розглянуті нижче. Використовувані методи та технологічні параметри осадження впливають на мікроструктуру отриманих шарів. Плівки можуть бути щільними з аморфною або мікрокристалічною структурою, або демонструвати стовпчастий ріст з значними порожнечами. Оптичні константи явно залежать від цієї мікроструктури, і плівки з одних і тих самих матеріалів іноді можуть мати дуже різні властивості, залежно від способу їх нанесення [48]. Окремі плівки в багатошаровому матеріалі можуть перебувати під напругою стиснення або розтягування, і якщо не підібрані матеріали та товщина

плівки для компенсації цих напруг, загальна напруга може бути досить великою, щоб деформувати підкладку або викликати руйнування багатошарової структури. Механічні властивості багатошарових покриттів також критично залежать від мікроструктури плівок [49].

Випаровування

Звичайне (нереактивне) або реактивне випаровування з резистивних, індукційних джерел або електронно-променевих гармат являє собою низько енергетичний процес ($\sim 0,1$ eV), отримані плівки часто мають пористу структуру. Пористість може змінюватися залежно від матеріалу, температури підкладки, залишкового тиску в камері осадження, швидкості осадження та кута падіння пари на підкладку. При впливі атмосфери деякі порожнечі в плівці можуть поглинати водяну пару. Це збільшує ефективний показник заломлення плівок та призводить до зміщення спектральних характеристик багатошарового матеріалу в бік більш довгих довжин хвиль (“старіння”). Цей зсув частково оборотним – шляхом розміщення фільтра в інертній атмосфері або у вакуумі або при нагріванні частина адсорбованої водяної пари може бути видалена. Якщо не враховувати цього на стадії проектування, таке процес “старіння” може зробити деякі фільтри неефективними.

Суттєвий вплив на мікроструктуру плівок можна здійснювати шляхом бомбардуванням підкладки під час осадження енергетичними іонами з допоміжного джерела іонного пучка. Додаткова енергія (\sim від 50 до 100 eV) призводить до більш щільних плівок. Отже, покриття, отримані *іонним осадженням*, мають більш високі показники заломлення і виявляють меншу схильність до старіння при впливі атмосфери.

Процес *іонного осадження* дозволяє отримувати навіть більш щільні покриття [49, 50]. У цьому процесі з високою швидкістю осадження вихідний матеріал повинен бути хорошим провідником і зазвичай являє собою метал. Аргон і реакційноздатні гази вводять в камеру та разом з випарником іонізують. Потім іони прискорюються до підкладки з енергіями порядку від 10 до 50 eV. За

допомогою цього процесу можна отримати прозорі плівки з майже об'ємною щільністю та низькими температурними коливаннями показника заломлення.

Зазвичай при випаровуванні тонкі плівки можуть перебувати в умовах стискаючих або розтягуючих напружень. Якщо їх не контролювати, ці напруження можуть спотворювати підкладку або спричинити розпад багатошаровості. Величина напружень залежить від матеріалу та умов осадження. Можна підібрати матеріали та параметри процесу таким чином, щоб напруження різних шарів протидіяли одне одному. На противагу цьому майже всі іонно осаджені шари знаходяться під стискуючою напругою. Таким чином, за допомогою цього процесу важче виготовляти багатокомпонентні структури з компенсацією напруги.

Розпилення

Реактивне або нереактивне магнетронне розпилення на постійному або високочастотному струмі також використовується для нанесення оптичних багатошарових покриттів. Існує багато варіантів цього процесу [51]. Більшість з них значно повільніші за процес випаровування, до того ж вартість мішеней може бути досить високою. Внаслідок цього оптичні фільтри, виготовлені за технологією постійного або високочастотного розпилення можуть також бути дорожчими. Проте процес є стабільним, забезпечує чудовий контроль товщини шарів, його можна легко масштабувати, для забезпечення рівномірного покриття на великих площах. Можна отримувати як шари металу, так і оксиду металу. Розпилення є енергетичним процесом і призводить до утворення щільних, об'ємноподібних шарів, які практично не піддаються старінню.

При *іонно-променевому розпиленні* енергетичний пучок інертних іонів спрямований на мішень, виконану з матеріалу, який повинен бути осаджений. Атоми або кластери атомів матеріалу вибиваються з мішені та осаджуються на підкладку з високою енергією. Це самий повільний фізичний метод осадження тонкоплівкових шарів, крім того його важко масштабувати для покриття великих компонентів. Однак він дає можливість отримувати покриття найвищої якості.

Таким чином можна отримувати покриття з високою відбивною здатністю для лазерних гіроскопів, в яких не допускаються значні втрати [5].

Осадження з розчинів

Під час цієї процедури підкладку або занурюють в металоорганічний розчин і виводять з нього дуже стійкою швидкістю, або розчин наносять з піпетки на підкладку, що обертається. Потім підкладку поміщають в піч для видалення розчинника. Товщина плівки залежить від концентрації розчинника та від швидкості вилучення або обертання. Іншими факторами, які впливають на процес, є температура та вологість, а також свіжість розчину. Хоча за допомогою цього способу отримуються доволі пористі плівки, він представляє інтерес, оскільки шари, отримані таким чином, мають високий поріг пошкодження лазером, про який було сказано вище. Спосіб також адаптований для покриття підкладок досить великої площі багат шаровими антирефлекторними покриттями на скляних підкладках.

Контроль товщини під час осадження

Ефективність функціонування оптичних багат шарових структур у вирішальній мірі залежить від товщини окремих шарів. Тому дуже важливим є контроль товщини шарів під час їх формування. Існує багато різних способів контролю товщини шарів. Для дуже стабільних процесів осадження, таких як розпилення, простий розрахунок часу може дати хороші результати. Однак найпоширенішими методами є кварцовий кристал та оптичний моніторинг. Перший дуже чутливий і може використовуватися для тонких і товстих, а також прозорих і непрозорих плівок. Однак це непрямий метод, що вимагає ретельного калібрування. Зазвичай це не є проблемою, коли шари формуються з використанням стандартних умов геометрії та осадження. Оптичний моніторинг може здійснюватися безпосередньо на підкладці або опосередковано на склі. Вимірювані величини зазвичай пропускання T , відбивання R або еліпсометричні параметри. Однією з переваг прямого оптичного моніторингу є те, що вимірювані параметри зазвичай тісно пов'язані з необхідними показниками. Крім того, за допомогою оптичного моніторингу можливе визначення та компенсація помилок

у режимі реального часу після нанесення кожного шару шляхом повторної оптимізації решти шарів системи [52]. За допомогою цього методу можна виготовити досить складні багат шарові структури.

Висновки до розділу та постановка задач роботи

Аналіз сучасного стану розробки, досліджень, застосування оптично селективних елементів показав наявність наступних проблем:

- не вивчений аспект впливу мікроструктури нанорозмірних компонент композитних структур на їх оптичні параметри;
- не досліджено вплив на спектральні характеристики проміжних нанорозмірних композитних шарів, які виникають при формуванні шаруватих оптично селективних структур;
- необхідність експериментального дослідження електромагнітного відгуку нанорозмірних компонент на електромагнітний вплив для достовірного прогнозування оптичних характеристик оптично селективних елементів, які формуються на їх основі;
- відсутність достовірних обчислювальних алгоритмів оцінки оптичних параметрів нанокомпозитних структур;
- розробка та проектування найбільш прийнятних для масового промислового виробництва оптично селективних покриттів. Найбільш актуальні завдання в цьому відношенні полягають в зниженні вартості покриттів (при збереженні їх функціональної ефективності) за рахунок зменшення числа проміжних технологічних операцій при їх виготовленні, а також у збільшенні терміну служби покриттів.

На основі аналізу вказаних проблем поставлено мету та завдання дисертаційних досліджень.

Метою дисертаційної роботи є розробка оптично селективних елементів з заданими спектральними характеристиками на основі нанокомпозитних структур

з врахуванням особливостей мікроструктури та оптичних параметрів нанорозмірних компонент.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- Провести експериментальні та теоретичні дослідження спектральних залежностей оптичних параметрів наноструктурних компонент композитних матеріалів.

- Розробити обчислювальні алгоритми оцінки оптичних параметрів нанокompозитних структур.

- Дослідити вплив на спектральні характеристики шаруватих структур проміжних нанокompозитних шарів.

- Встановити апроксимаційні моделі оптичних параметрів нанорозмірних компонент.

- Розробити оптично селективні елементи на основі нанокompозитних структур.

Надалі в роботі буде введена певна термінологія, зокрема, термін товщина плівки (шару) відповідає ваговій товщині плівки – деякій умовній товщині, яку б мала плівка за умови рівномірного розподілу конденсату по усій поверхні підкладки з щільністю, рівній щільності початкового матеріалу [37].

РОЗДІЛ 2

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОРОЗМІРНИХ КОМПОНЕНТ

В спектрально-селективних багатошарових металодіелектричних покриттях, що мають «вікно прозорості» у видимому діапазоні спектру та високе відбивання в інфрачервоному діапазоні, використовуються тонкі напівсуцільні (сітчасті) плівки металу (Ag, Au, Cu) з ваговою товщиною від 1 до 35 нм та діелектричні просвітлюючі плівки товщиною від 20 до 100 нм. У таких межах значень товщини металеві та діелектричні плівки формуються як наносистеми, структура яких залежить від матеріалу, методів і режимів напилення шарів, від їх товщини та мікроструктури підкладки. Крім того, в процесі виготовлення шаруватого покриття між різними плівками в ньому в результаті дифузійних процесів і впливів атмосферного кисню можуть утворюватися бар'єрні, або поверхневі оксидні шари, що істотно змінюють спектроскопічні характеристики (спектри пропускання T і відбиття R) покриття, а також ефективні оптичні характеристики провідних шарів (коефіцієнти заломлення n , поглинання k і товщину d), що ускладнює моделювання (в сенсі отримання модельних спектрів T і R адекватних експериментальним спектрам) шаруватих металодіелектричних покриттів. Знання реальних ефективних оптичних постійних (n , k і d) провідних шарів покриття або одношарових покриттів необхідне для адекватного прогнозування оптичних властивостей всієї системи і електрофізичних характеристик провідного шару в металодіелектричних покриттях.

2.1. Метод розрахунку оптичних характеристик шаруватих структур

Багатошарову тонкоплівкову систему зручно описувати за допомогою співвідношень матричної оптики шаруватих середовищ [53]. Розрахунок спектрів пропускання (T) і відбивання (R , R') таких систем за відомими оптичним постійним складових шарів та їх товщин на основі матричних співвідношень може розглядатися як пряма спектрофотометрична задача матричної оптики

шаруватих середовищ. Це пов'язано з тим, що спектрофотометричні матричні співвідношення записані так, що виражають T і R (R') всієї системи через n , k і d кожного шару. Розв'язок прямої задачі може бути реалізовано за допомогою різних матричних схем, найбільш зручною з яких є схема послідовного нарощування шарів [54].

Вибір матричного методу послідовного нарощування шарів в даній роботі обумовлений такими його перевагами перед іншими матричними методами:

- застосовується в широкій області спектру, при його використанні не потрібно знання будь-яких попередніх модельних уявлень про характер електромагнітного відгуку кожного шару;
- не накладає жодних обмежень на число шарів покриття і порядок чергування поглинаючих і непоглинаючих шарів;
- матриця кожного шару в покритті залежить лише від характеристик самого шару і не залежить від параметрів попереднього шару.

Відзначимо, що математичною основою будь-якого матричного методу служить матрична алгебра, а правомірність матричного методу для опису електромагнітного відгуку шаруватої системи забезпечується лінійністю рівняння Максвелла.

Основні співвідношення матричного методу послідовного нарощування шарів

В основі розглянутого матричного методу лежить розвинена Абелесом теорія поширення плоских електромагнітних хвиль в шаруватих системах [55]. Ця теорія заснована на введенні матриць другого порядку для характеристики електромагнітного відгуку всієї системи і кожного шару в ній. Зупинимося на ключових співвідношеннях цього методу.

Обмежимося випадком шаруватого середовища (зокрема, це може бути шарувате покриття), що складається з плоскопаралельних, однорідних та ізотропних шарів. Загальна кількість шарів позначимо через N . Кожен шар будемо характеризувати символом j , показником заломлення n_j (у випадку провідних речовин n_j є комплексною величиною $n_j = \hat{n} - ik_j$) і товщиною d_j . Для оточуючих

шарувату систему середовищ ведемо індекси $j = 0$ (скло: n_0) та $j = N + 1$ (повітря: $n_e = 1$). Будемо припускати, що шарувате середовище поширюється в просторі від точки $z = z_0$ до точки $z = z_{N+1}$ ($z_0 < z_{N+1}$).

Електромагнітне поле всередині j -го шару буде складатися з поля хвилі, що поширюється у напрямку до границі j -го шару з шаром $j+1$ -м і поля хвилі відбитої від цієї границі:

$$\left. \begin{aligned} E_j &= E_j^+ + E_j^- \\ H_j &= H_j^+ + H_j^- \end{aligned} \right\}. \quad (2.1)$$

Знаки (+) та (-) відповідають верхній та нижній стороні границі. E_j , E_j^+ , E_j^- та H_j , H_j^+ , H_j^- – відповідно напруженості електричного і магнітного поля. Характер відбивання і заломлення на межі двох середовищ буде цілком визначатися умовами нерозривності тангенціальних складових напруженості електричного і магнітного полів хвилі. Використовуючи матричний метод Абелеса відповідно до робіт [56, 57], представимо тангенціальні складові \tilde{E} та \tilde{H} напруженостей E та H у вигляді двовірного вектора:

$$Q_j(z_j) = \begin{vmatrix} \tilde{E}_j \\ \tilde{H}_j \end{vmatrix}. \quad (2.2)$$

Згідно своєму визначенню, вектори $Q_j(z_j)$ повинні бути неперервні на будь-якій з границі розділу середовищ:

$$Q_{j+1}(z_j) = Q_j(z_j). \quad (2.3)$$

Розглядаючи границю розділу між шарами z_j і z_{j-1} та виходячи з умови неперервності векторів $Q_j(z_j)$, Абелес показав, що електричне $E_j(z_j)$ та $H_j(z_j)$ магнітне поля пов'язані з полями $E_j(z_{j-1})$ та $H_j(z_{j-1})$ наступними співвідношеннями [57]:

$$Q_j(z_j) = M_j Q_j(z_{j-1}). \quad (2.4)$$

або в розгорнутому записі

$$\begin{pmatrix} E(z_j) \\ H(z_j) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & iM_{12} \\ iM_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E(z_{j-1}) \\ H(z_{j-1}) \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

Дворядна матриця M_j називається характеристичною матрицею [57-59] або матрицею інтерференції [56].

Елементом цієї матриці є взяті в точці $z = z_{j-1}$ рішення системи чотирьох диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\begin{aligned} M'_{11} &= -\frac{2\pi}{\lambda} [n(z)]^2 M_{12}; & M'_{12} &= \frac{2\pi}{\lambda} M_{11} \\ M'_{21} &= \frac{2\pi}{\lambda} [n(z)]^2 M_{22}; & M'_{22} &= -\frac{2\pi}{\lambda} M_{21}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Початкові умови для них рівні:

$$\begin{aligned} M_{11}(z_0) &= 1; & M_{12}(z_0) &= 0; \\ M_{21}(z_0) &= 0; & M_{22}(z_0) &= 1. \end{aligned} \quad (2.7)$$

На підставі співвідношень (2.4)-(2.7) можна показати, що матриця інтерференції шару за умови його однорідності має вигляд:

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos F_j & i \left(\frac{1}{u_j} \sin F_j \right) \\ i u_j \sin F_j & \cos F_j \end{pmatrix}. \quad (2.8)$$

Тут

$$F_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \varphi_j, \quad (2.9)$$

$$u_j = \begin{cases} n_j \cos \varphi_j & \text{— для } s\text{-компоненти} \\ \frac{n_j}{\cos \varphi_j} & \text{— для } p\text{-компоненти} \end{cases} \quad (2.10)$$

де: φ_j — кут заломлення в j -м середовищі; λ — довжина хвилі електромагнітного випромінювання; p — складова поляризації електричного поля, що лежить в площині падіння променя; s — складова поляризації в площині перпендикулярній площині падіння променя. В роботі [56] величина F_j називається порядком інтерференції.

Використовуючи неперервність тангенціальних складових векторів E і H та стовпця Q_j , на кожній межі розділу легко показати, що повна матриця інтерференції шаруватого середовища являє собою добуток матриць окремих шарів в ній [56, 57]:

$$M = \begin{vmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & \frac{1}{n_1} \\ 1 & -\frac{1}{n_1} \end{vmatrix} \left\{ \prod_{j=1}^N \begin{bmatrix} \cos \frac{2\pi \tilde{n}_j d_j}{\lambda} & i \frac{1}{\tilde{n}_j} \sin \frac{2\pi \tilde{n}_j d_j}{\lambda} \\ i \tilde{n}_j \sin \frac{2\pi \tilde{n}_j d_j}{\lambda} & \cos \frac{2\pi \tilde{n}_j d_j}{\lambda} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_2 & -n_2 \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Матриці M_j входять в цей добуток в такому ж порядку, в якому розташовується відповідний шар. Для всієї шаруватої системи справедливо співвідношення:

$$Q_N(z_N) = M Q_0(z_0). \quad (2.12)$$

Розглядаючи (окремо для s - та p -компонент) тангенціальні складові \tilde{E}^+ та \tilde{E}^- також як компоненти двовірного вектора Q_j , можна показати, що вектор Q_j пов'язаний з вектором \tilde{Q}_j виразом:

$$\tilde{Q}_j = V_j Q_j. \quad (2.13)$$

де

$$V_j = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & \frac{1}{u_j} \\ 1 & -\frac{1}{u_j} \end{vmatrix}. \quad (2.14)$$

При цьому з співвідношень (2.12) і (2.13) слідує:

$$\tilde{Q}_{N+1}(z_N) = V_{N+1} M V_0^{-1} Q(z_0), \quad (2.15)$$

де V_0^{-1} – матриця, зворотна V_0 .

Для шару вона має вигляд:

$$V_j^{-1} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ u_j & -u_j \end{vmatrix}. \quad (2.16)$$

Матричний добуток, що входить у вираз (2.15), визначає так звану [56] матрицю заломлення шаруватого середовища (багатошарового покриття):

$$W_{(N+1),0} = V_{N+1} M V_0^{-1}. \quad (2.17)$$

Елементами матриці заломлення шаруватого середовища є френелівські амплітудні коефіцієнти пропускання та відбивання. Для границі розділу між j -м та k -м шаром матриця заломлення дається співвідношенням:

$$W_{jk} = \frac{c_{jk}}{t_{jk}} \begin{vmatrix} 1 & -r_{kj} \\ r_{jk} & d_{jk} \end{vmatrix}. \quad (2.18)$$

Тут

$$d_{jk} = t_{jk} t_{kj} - r_{jk} r_{kj}, \quad (2.19)$$

$$c_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{— для } s\text{-компоненти} \\ \cos \varphi_j & \\ \cos \varphi_k & \text{— для } p\text{-компоненти} \end{cases} \quad (2.20)$$

де t_{jk} , t_{kj} і r_{jk} , r_{kj} — відповідно, амплітудні коефіцієнти пропускання та відбивання для променя, падаючого з середовища шару границю з середовищем або навпаки.

Таким чином, співвідношення (2.17) є ключовим для даного методу і дозволяє легко знаходити френелівські амплітудні коефіцієнти пропускання t та відбивання r всієї шаруватої системи (шарувато покриття) на підставі відомостей про показники заломлення і товщини складових її шарів.

Однак при конструюванні багатошарових покриттів необхідно знати не тільки їх монохроматичні френелівські амплітудні коефіцієнти пропускання та відбивання, але також їх монохроматичні енергетичні коефіцієнти пропускання та відбивання, які зазвичай і доступні безпосереднім вимірюванням. Разом з тим формула (2.17), яка приводиться як підсумкова для матричного методу послідовно нарощування шарів в загальновідомих працях [56-59], описує взаємозв'язок між матрицею заломлення і матрицею інтерференції шаруватої системи в самому узагальненому вигляді. Це ускладнює її використання в практичних завданнях. Зазначені обставини і зумовили необхідність розробки спеціального обчислювального алгоритму матричного методу послідовного нарощування шарів для випадку багатошарових енергетично ефективних покриттів на прозорих діелектричних підкладках (зокрема, скла).

2.2. Обчислювальний алгоритм на основі послідовного нарощування шарів

Конструювання багат шарових енергозберігаючих покриттів на основі матричного методу послідовного нарощування шарів являє собою пряму задачу матричної оптики. В загальному випадку вона полягає в розрахунку значень монохроматичних енергетичних коефіцієнтів пропускання T і відбиття R з боку покриття і з боку підкладки R' для двошарової системи (багат шарове покриття + скло) за відомими величинам показників заломлення n і поглинання k , а також товщини d кожного шару покриття на основі матричного співвідношення (2.17) і формула Френеля, які взаємозв'язок з монохроматичними френелівськими амплітудними коефіцієнтами пропускання t , r та r' для s - і p -складових електромагнітної хвилі.

Варто вказати, що зворотна задача матричної оптики полягає в загальному випадку у визначенні значень еквівалентних показника заломлення всієї багат шарової системи за відомими її T , R або T , R' . В окремому випадку одношарового покриття – в знаходженні значень його показників заломлення і поглинання за виміряним для двошарової системи (покриття/підкладка) величинам T , R або T , R' .

При розгляді завдань конструювання нових багат шарових покриттів, пов'язаних з поляриметричними вимірюваннями (опромінення зразків поляризованим світлом), значення монохроматичних енергетичних коефіцієнтів пропускання $T_{p,s}$ і відбивання $R_{p,s}$ (з боку покриття) і $R'_{p,s}$ (з боку підкладки) для випадків s - та p -станів поляризації світла можуть бути отримані на підставі співвідношень, наведених в роботах [56, 58]:

$$T_{p,s} = \frac{\cos \varphi_k}{\cos \varphi_0} |t_{p,s}|^2, \quad R_{p,s} = |r_{p,s}|^2, \quad R'_{p,s} = |r'_{p,s}|^2. \quad (2.21)$$

У випадку вирішення задачі конструювання багат шарових покриттів, пов'язаних спектрофотометричними вимірюваннями (опромінення зразків не поляризованим світлом), необхідно знати спектральний розподіл T , R , R' покриття для неполяризованого світла. Відповідно до робіт [56, 60] в цьому випадку

монохроматичні енергетичні коефіцієнти пропускання T , відбивання з боку покриття R і з боку підкладки R' можуть бути представлені виразами:

$$T = \frac{n_2 \cos \alpha_2}{n_1 \cos \alpha_1} \left(\frac{|t_s|^2 + |t_p|^2}{2} \right),$$

$$R = \frac{|r_s|^2 + |r_p|^2}{2},$$

$$R' = \frac{|r'_s|^2 + |r'_p|^2}{2}. \quad (2.22)$$

Величини, які входять в формули мають такий зміст:

t_s, t_p – монохроматичні френелівські амплітудні коефіцієнти пропускання зразка (покриття на підкладці); r_s, r_p – монохроматичні френелівські амплітудні коефіцієнти відбивання з боку покриття; r'_s, r'_p – монохроматичні френелівські амплітудні коефіцієнти відбивання з боку підкладки; $\cos \alpha_1$ і $\cos \alpha_2$ – косинуси кутів, утворені променем з нормаллю до поверхні межі двох середовищ (першого з показником заломлення n_1 і другого з показником заломлення n_2). Величина $\cos \alpha_2$ визначається зі співвідношення:

$$\cos \alpha_2 = \frac{1}{2} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha_1}. \quad (2.23)$$

Розрахунок енергетичних коефіцієнтів пропускання і відбивання багат шарових покриттів проводиться на основі вищенаведених співвідношень.

2.3. Визначення оптичних параметрів нанорозмірних шарів

Для того щоб врахувати всі особливості формування шарів в складі шаруватих металодіелектричних систем, що впливають на їх оптичні та електрофізичні параметри, нами був розроблений обчислювальний матричний алгоритм визначення ефективних показників заломлення n , поглинання k і товщини d поглинаючої плівки в складі багат шарової тонкоплівкової системи (наприклад, типу діелектрик/метал/діелектрик) по виміряним для неї спектрами пропускання T і відбивання R (з боку покриття), R' (з боку підкладки). Він

заснований на вирішенні матричного рівняння для шаруватої системи ітераційним методом безперервного диференціального спуску [56-59].

Одним з перспективних засобів дослідження електрофізичних властивостей наноструктурних матеріалів є експериментально аналітичний підхід, який включає в себе дві групи задач [61, 62]. Перша група пов'язана з безпосередніми експериментальними дослідженнями об'єктів, що вивчаються. До таких досліджень відносяться вимірювання електромагнітного відгуку наноструктурних систем та визначення їх мікроструктурних параметрів. Зокрема, при оптичних дослідженнях це фотометричні вимірювання наноструктурних систем [62, 63].

До другої групи належать дослідження, пов'язані з обробкою експериментальних даних шляхом розв'язання прямих і зворотних задач тих чи інших теорій оптичних властивостей нанодисперсних систем [64-67].

Зокрема, ефективні параметри плівки (показник заломлення n_{ef} , показник поглинання k_{ef} , товщина плівки d) пов'язані з енергетичними оптичними характеристиками T , R за допомогою виразів феноменологічної теорії [61, 63], які в формі операторів мають вигляд:

$$T = F_T\left(n_{\text{ef}}, k_{\text{ef}}, \frac{d}{\lambda}\right), \quad R = F_R\left(n_{\text{ef}}, k_{\text{ef}}, \frac{d}{\lambda}\right), \quad R' = F_{R'}\left(n_{\text{ef}}, k_{\text{ef}}, \frac{d}{\lambda}\right). \quad (2.24)$$

де F_T , F_R , $F_{R'}$ – оператори відображення.

Визначення T , R і R' за відомими значеннями оптичних параметрів на підставі системи рівнянь (2.24) називається прямою задачею спектрофотометрії дисперсної металодіелектричної системи, а знаходження оптичних параметрів по виміряним значенням T , R , R' – зворотною задачею.

Модель опису електромагнітного відгуку нанорозмірних композитних шарів

Модель призначена для опису електромагнітного відгуку шаруватих систем, які включають наноструктурні композитні шари.

Модель встановлює зв'язок електромагнітних характеристик компонент композитних наноструктурних систем та їх структурних параметрів з відгуком системи (T , R , R') на електромагнітний вплив. Зокрема, у випадку композитних шарів на основі нанорозмірних металевих компонент встановлено взаємозв'язок

T , R , R' з електромагнітними параметрами компоненти (ε_i), діелектричного середовища, в якому вони зосереджені (ε_m), розміром (D_0) та концентрацією (N_V) та товщиною шарів (d_i) [68].

Математична модель опису електромагнітних властивостей композитних матеріалів заснована на наближенні ефективного середовища, відповідно до якого для розгляду електромагнітного відгуку реальної нанодисперсної композитної системи на зовнішнє електромагнітне поле вона моделюється однорідним "ефективним середовищем" (в окремому випадку однорідним ізотропним плоско-паралельним шаром [61, 69, 70]) та характеризується, зокрема, ефективною діелектричною проникністю ε_{ef} . Для моделювання металодіелектричних нанодисперсних систем застосовано модифіковану теорію Бруггемана, відповідно до якої ефективна комплексна діелектрична проникність середовища $\varepsilon_{\text{ef}} = \varepsilon_{\text{ef}1} - i\varepsilon_{\text{ef}2}$ задається співвідношенням [71, 72]:

$$\varepsilon_{\text{ef}} = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_{\text{d}} + 2\varepsilon_h (v\varepsilon_i + (1-v)\varepsilon_{\text{d}})}{2\varepsilon_h + v\varepsilon_{\text{d}} + (1-v)\varepsilon_i}, \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_h = z\varepsilon_i + (1-z)\varepsilon_{\text{d}},$$

де v – фактор заповнення середовища, ε_h , z – структурні параметри металодіелектричного середовища, $\varepsilon_i = \varepsilon_{i1} - i\varepsilon_{i2}$ – комплексна діелектрична проникність металеві частинки; ε_{d} – діелектрична проникність матриці.

Співвідношення (2.25) в граничних випадках при відповідних параметрах мікроструктури зводиться до відомих виразів теорії Максвелла-Гарнетта та теорії Бруггемана. Зокрема, в випадку $\varepsilon_h = \varepsilon_{\text{d}}$, $z = 0$ структура металодіелектричної системи представляє ізольовані металеві компоненти хаотично розподілені в діелектричному середовищі. У випадку значень параметрів $\varepsilon_h = \varepsilon_i$, $z = 1$ металодіелектрична система характеризується перервною неоднорідною структурою, що відповідає високій концентрації металеві компоненти та описується співвідношенням теорії Бруггемана [73]:

$$v \frac{\varepsilon_h - \varepsilon}{\varepsilon_h + 2\varepsilon} + (1-v) \frac{\varepsilon_{\text{d}} - \varepsilon}{\varepsilon_{\text{d}} + 2\varepsilon} = 0. \quad (2.26)$$

Внаслідок чого, модифікована теорія Бругемана дозволяє більш точно враховувати мікроструктуру в реальних металодіелектричних системах. Однорідна структура по розмірах представляє інтерес при фундаментальних дослідженнях, тоді як в практичних застосуваннях реальних металодіелектричних систем характерна саме неоднорідна структура по розмірах металевих компонент [74].

Проведено аналіз зворотних задач моделей ефективного середовища та одержано їх аналітичні розв'язки. Алгоритм рішення зворотної задачі теорії Бругемана можна представити в вигляді [75]:

$$\varepsilon_1 - i\varepsilon_2 = \frac{ac + cd}{c^2 + d^2} - i \frac{ad - bc}{c^2 + d^2}. \quad (2.27)$$

де

$$\begin{aligned} a &= 2(\bar{\varepsilon}_1^2 - \bar{\varepsilon}_2^2) - \bar{\varepsilon}_1 \varepsilon_2 (3f - 2), \\ b &= -4\bar{\varepsilon}_1 \bar{\varepsilon}_2 - \bar{\varepsilon}_2 \varepsilon_2 (3f - 2), \\ c &= \varepsilon_2 - \bar{\varepsilon}_1 (1 - 3f), \\ d &= \bar{\varepsilon}_2 (1 - 3f). \end{aligned}$$

Оскільки в теоріях ефективного середовища не отримані співвідношення, що зв'язують параметри електромагнітного відгуку T , R , R' з $\varepsilon_{\text{сф}}$, тому для цього можна використати феноменологічну теорію електромагнітних властивостей тонких плівок [76].

Остання базується на класичних формулах Френеля для амплітудних коефіцієнтів пропускання і відбивання електромагнітного випромінювання поверхнею. Перевагою цього підходу є те, що в його рамках для аналізу взаємодії електромагнітного випромінювання з композитним дисперсним середовищем немає необхідності вирішувати рівняння Максвелла в кожній точці простору. Для випадку нормального падіння електромагнітної хвилі на поверхню поглинаючого композитного шару в припущенні, коли поглинаючий шар товщиною d знаходиться між двома однорідними ізотропними середовищами з показниками заломлення n_1 і n_2 співвідношення феноменологічної теорії, що зв'язують n і k

(ефективні параметри) шару з коефіцієнтами пропускання I_T , відбивання з боку шару I_R і підкладки $I_{R'}$ мають вигляд [77]:

$$\begin{aligned} I_T &= \frac{16n_1n_2(n^2 + k^2)}{u \cdot \tau e^{k\gamma} + x \cdot \sigma e^{-k\gamma} + 2s \cdot \cos n\gamma + 2t \cdot \sin n\gamma}, \\ I_R &= \frac{x \cdot \tau e^{k\gamma} + u \cdot \sigma e^{-k\gamma} + 2q \cdot \cos n\gamma + 2r \cdot \sin n\gamma}{u \cdot \tau e^{k\gamma} + x \cdot \sigma e^{-k\gamma} + 2s \cdot \cos n\gamma + 2t \cdot \sin n\gamma}, \\ I_{R'} &= \frac{\sigma \cdot \mu e^{k\gamma} + \tau \cdot x e^{-k\gamma} + 2\mu \cdot \cos n\gamma - 2r \cdot \sin n\gamma}{u \cdot \tau e^{k\gamma} + x \cdot \sigma e^{-k\gamma} + 2s \cdot \cos n\gamma + 2t \cdot \sin n\gamma} \end{aligned} \quad (2.28)$$

де

$$x = (n - n_1)^2 + k^2, \quad u = (n + n_1)^2 + k^2, \quad \sigma = (n - n_2)^2 + k^2, \quad \tau = (n + n_2)^2 + k^2,$$

$$\mu = (n^2 + k^2)(n_1^2 + n_2^2) - (n^2 + k^2) - n_1^2 n_2^2 - 4n_1 n_2 k^2,$$

$$s = (n^2 + k^2)(n_1^2 + n_2^2) - (n^2 + k^2) - n_1^2 n_2^2 + 4n_1 n_2 k^2,$$

$$r = 2k(n_2 - n_1)(k^2 + n^2 + n_1 n_2),$$

$$t = 2k(n_2 + n_1)(k^2 + n^2 - n_1 n_2),$$

$$\gamma = \frac{4\pi d}{\lambda}, \quad n_1, n_2 - \text{відповідно показники заломлення повітря та підкладки.}$$

Для того, щоб врахувати кінцеві розміри підкладки і багаторазове відбивання в ній, використовують співвідношення, що зв'язують I_T , I_R , $I_{R'}$ з експериментально вимірюваними енергетичними коефіцієнтами T , R , R' [78]:

$$\begin{aligned} R &= I_R + \frac{\theta}{1 - \theta I_{R'}} I_T^2, \\ T &= \frac{1 - \theta}{1 - \theta I_R} I_T, \\ R' &= \frac{I_{R'} + \theta - 2\theta I_{R'}}{1 - m\theta I_{R'}}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\text{де } \theta = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2.$$

Показник заломлення n та поглинання k пов'язані з її діелектричної проникністю співвідношеннями [79]:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_1 - i\varepsilon_2 = (n - ik)^2; \\ \text{або } \varepsilon_1 &= n^2 - k^2, \varepsilon_2 = 2nk.\end{aligned}\tag{2.30}$$

Для випадку багатошарової системи для опису T , R , R' за відомими значеннями електромагнітних параметрів шарів та їх товщини використано матричні співвідношення, зокрема послідовного нарощування шарів, які представлені в розділі 2.1.

У загальному випадку зворотна спектрофотометрична задача матричної оптики – знаходження n та k всіх шарів, що входять в шарувату систему по відомим для неї T і R , математично нерозв'язна. Часткова зворотна задача визначення n і k одного поглинаючого шару в складі багатошарової системи по виміряним для неї значень коефіцієнтів пропускання та відбивання, в принципі, допускає чисельний розв'язок за умови, що відомі товщина цього шару, а також оптичні параметри і товщини інших шарів [80].

Запропонована математична модель заснована на наближенні ефективного середовища та застосуванні феноменологічної теорії електромагнітних властивостей плівок або матричного методу.

Модель застосовується при наступних припущеннях:

- багатошарова структура включає N ізотропних, однорідних, плоскопаралельних шарів;
- кожен шар визначається ефективними спектральними комплексними електромагнітними параметрами (n_j, ε, μ) , ефективною товщиною $(d_j, j$ – індекс шару);
- у випадку одношарової структури металодіелектрична система розташована між двома напівнескінченими однорідними та ізотропними середовищами.

Перевагою представленої моделі є те, що вона дозволяє оцінити відгук на електромагнітне збурення одношарових і багатошарових композитних наноструктурних систем. Зокрема, як у випадку вільних від підкладки шарів

(класична система рівнянь феноменологічної теорії електромагнітних властивостей плівок), так і шаруватих структур на підкладці (матричний метод). Слід зазначити, що електромагнітний відгук металодіелектричних наноструктурних систем в значній мірі залежить від її мікроструктури, що ускладнює їх моделювання. Наведена модель в разі використання матричного методу не накладає яких-небудь обмежень на кількість шарів та дає можливість враховувати неоднорідність композитної структури шляхом розділення її на окремі шари та описати особливості кожного шару характеристичною матрицею [81].

Рішення оберненої задачі феноменологічної теорії в силу трансцендентності систем рівнянь (2.26) представляє значні труднощі.

Точна спектрофотометрична система рівнянь феноменологічної теорії в випадку нанорозмірних плівок є математично некоректною. Це виражається в крайній нестійкості (чутливості) результатів її рішення до невеликих (але неминучих) похибок вимірів T і R і, як наслідок, в неможливості рішення даної системи рівнянь звичайними чисельними методами. В якості регуляризаційного обчислювального методу її розв'язку використано метод безперервного диференціального спуску, який запропоновано та апробовано для нанодисперсних систем у роботах [82, 83]. Суть цього методу полягає в заміні початкової математичної некоректної системи рівнянь (2.28) еквівалентною їй системою диференціальних рівнянь безперервного спуску [84]:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{f_1 \frac{\partial f_1}{\partial n} + f_2 \frac{\partial f_2}{\partial n}}{\left(f_1 \frac{\partial f_1}{\partial n} + f_2 \frac{\partial f_2}{\partial n} \right)^2 + \left(f_1 \frac{\partial f_1}{\partial k} + f_2 \frac{\partial f_2}{\partial k} \right)^2} \\ \frac{dk}{dt} &= -\left(f_1^2 + f_2^2 \right) \frac{f_1 \frac{\partial f_1}{\partial k} + f_2 \frac{\partial f_2}{\partial k}}{\left(f_1 \frac{\partial f_1}{\partial n} + f_2 \frac{\partial f_2}{\partial n} \right)^2 + \left(f_1 \frac{\partial f_1}{\partial k} + f_2 \frac{\partial f_2}{\partial k} \right)^2} \\ f_i &= Y_{ip} - Y_{ie}, \quad (i = 1, 2, 3) \end{aligned} \tag{2.31}$$

де

Y_{1e}, Y_{2e}, Y_{3e} – експериментально виміряні значення з варіацій T, R, R' ;

Y_{1p}, Y_{2p}, Y_{3p} – розраховані значення з варіацій T, R, R' , по співвідношенням (2.29) та (2.28),

n і k – ефективні показники заломлення і поглинання досліджуваного нанодисперсного шару;

dn/dt і dk/dt – траєкторії безперервного диференціального спуску до мінімумів функцій $|f_i|^2$.

Висновки до розділу 2

У даному розділі проаналізовано правомірність та переваги розрахунку оптичних характеристик шаруватих структур матричним методом послідовного нарощування шарів, представлені основні співвідношення та обмеження його застосування.

Показано, що точна спектрофотометрична система рівнянь феноменологічної теорії в випадку нанорозмірних плівок є математично некоректною. Це виражається в крайній нестійкості результатів її рішення до невеликих (але неминучих) похибок вимірів T і R і, як наслідок, в неможливості рішення даної системи рівнянь звичайними чисельними методами. В якості регуляризаційного обчислювального методу її розв'язку використано метод безперервного диференціального спуску. Суть цього методу полягає в заміні початкової математичної некоректної системи рівнянь еквівалентною їй системою диференціальних рівнянь безперервного спуску.

Запропоновано обчислювальний алгоритм на основі матричного методу послідовного нарощування шарів для розробки оптично селективних елементів у вигляді багат шарових покриттів та визначення оптичних параметрів нанорозмірних шарів багат шарової структури за відомими параметрами відгуку структури на електромагнітний вплив.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ НАНОРОЗМІРНИХ КОМПОНЕНТІВ СЕЛЕКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Для визначення електромагнітних характеристик нанорозмірних компонент в наноструктурних системах на основі запропонованої схеми виготовлені серії експериментальних зразків нанорозмірних структур та проведені їх спектрофотометричні та мікроструктурні дослідження. Представлені результати досліджень оптичних параметрів нанорозмірних компонентів селективних структур. Розроблено апроксимаційні моделі оптичних характеристик нанорозмірних металевих плівок.

3.1. Виготовлення нанорозмірних компонент

Для формування нанорозмірних структур розроблена схема отримання нанорозмірних плівок срібла. На основі хрому та срібла були виготовлені двошарові ($\text{Ag-Cr/Cr}_2\text{O}_3$), трьохшарові ($\text{Cr/Cr}_2\text{O}_3\text{-Ag-Cr/Cr}_2\text{O}_3$) покриття. Вказані зразки напилялися на вакуумній установці УВМ-15. Необхідно відзначити, що модернізована УВМ-15 додатково окрім системи термічного випаровування оснащена магнетронно-розпилювальною системою (МРС), що дозволяло наносити нанорозмірні плівки досліджуваних металів як методом магнетронного розпилення, так і термічного випаровування та порівняти їх особливості для формування нанорозмірних структур [85].

При виготовленні зразків використовували матеріали з наступними технічними параметрами: срібло (хімічна чистота 99,99%), хром (хімічна чистота 99,99%), кисень (ГОСТ 5583-78).

Осадження металевих та діелектричних плівок проводилось пошарово методом термічного випаровування, магнетронного розпилення та реактивного магнетронного розпилення на планетарних обертаючих швидкостях з 15-20 об/хв

на скляних підкладках (виготовлених із силікатного скла), підтримуваних при температурі близько 40 °С.

Підготовка підкладки включала в себе наступні операції: обезжирювання, промивку в дистильованій воді; сушку очищеним повітрям. Обробка в тліючому розряді у вакуумній камері. Осадження плівок срібла здійснювалось при тиску залишкових газів у камері $P = (1 \div 2) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Плівки хрому–оксиду хрому отримували методом реактивного розпилення металевого хрому в атмосфері кисню при тиску в камері $(7 \div 8) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

Для отримання плівок з прогнозованими параметрами у вакуумній камері контролювалася товщина плівок і швидкості їх осадження. Контроль товщини кожного шару та швидкість їх осадження проводилось методом кварцового резонатора [86]. Чутливість методу складає $2 \cdot 10^{-6}$ г/см², а точність визначення товщини плівки – 5%.

Після напилення зразків виносились з вакуумної камери для проведення оптичних досліджень.

З метою електронно-мікроскопічного аналізу мікроструктур осаджених плівок срібла, хрому та оксиду хрому у процесі напилення цих речовин конденсати, наносились на стандартні мідні сіточки з вуглецевим покриттям. Ці сіточки встановлювались спеціальної оснастці поблизу та паралельно із скляними підкладками, що забезпечувало, в силу аморфного стану скла та вуглецевих плівок, ідентичність мікроструктур осаджуваних плівок на склі та вуглецю. Таким чином, на мідних сіточках із вуглецевих покриттям були виготовлені моношари срібла з товщинами від 1 до 20 нм, моношари оксидованого хрому з товщинами від 1 до 30 нм. Одночасно з цим були отримані вказані лабораторні зразки плівок на скляних підкладках.

В якості нанодисперсної металевої компоненти металодіелектричних систем перспективними матеріалом являється мідь. Методика формування, експериментально-аналітичні дослідження та їх результати представлено нами в роботі [85]. Доцільність використання цього матеріалу обумовлена наступним.

Оптичні властивості ідентичні властивостям срібла [87, 88]. При цьому мідь технологічно сумісна з процесами застосовуваними в мікроелектронній технології. Тому можливість застосування міді замість срібла дозволяє зменшити собівартість створюваних елементів. Однак, використання міді обмежене недостатньою хімічною стійкістю, що може призводити до її окислення. В результаті це призводить до зміни оптичних параметрів плівки [89, 90]. Цю проблему можна вирішити розмістивши дисперговані частинки міді в хімічно стійкому діелектричному середовищі, або нанесенням на нанорозмірні шари міді захисних діелектричних шарів [91].

3.2. Методи дослідження

3.2.1. Спектрофотометричні дослідження компонентів оптично селективних елементів

Спектрофотометричні дослідження нанорозмірних плівок срібла на підкладках зі силікатного скла проводилися в діапазоні $0,3 \div 1,1$ мкм на спектрофотометрі СФ-16. Для вимірювання коефіцієнта відбивання використовувалася приставка дзеркального відбивання ПЗ0-1 при куті падіння світла близькому до нормального. Спектри відбивання нанодисперсних структур в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль $0,8 \div 2,5$ мкм вимірювалися на спектрофотометрі ІКС-14 при куті падіння електромагнітного випромінювання близькому до нормального [85, 92].

Похибка окремих вимірювань для T становили 1%, а R, R' – 2%. Точність вимірювань забезпечувалася з довірчою імовірністю $\rho = 0,95$ при виконанні трьох вимірів.

Оскільки при проведенні спектрофотометричних досліджень нанодисперсних структур необхідно було використовувати дисперсійні залежності показника заломлення підкладки n , то для визначення n були виміряні спектри пропускання підкладок T_0 при нормальному куті падіння ЕМ випромінювання [85].

Так як в досліджуваному діапазоні довжин хвиль товщина підкладки значно перевищувала λ , то ця обставина дозволила використовувати для оцінки співвідношення [93]:

$$T_0 = \frac{2n_2}{n^2 + 1} \quad (3.1)$$

Приклади спектральних залежностей коефіцієнтів відбивання, пропускання та відбивання зі сторони підкладки для товщини плівок срібла в діапазоні товщин від 0,7 до 1,7 нм представлені на рис. 3.1.

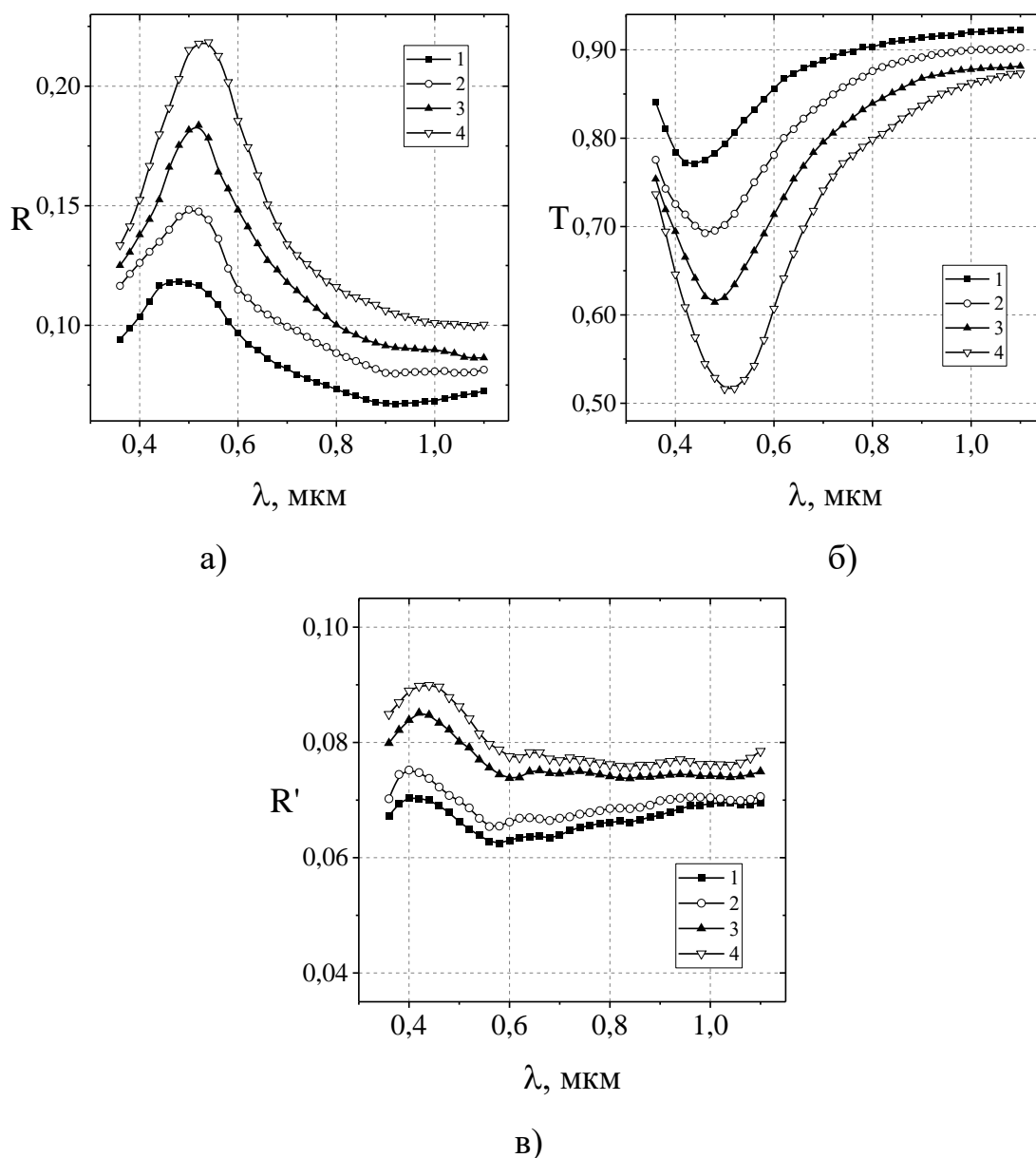


Рис. 3.1. Спектральні залежності коефіцієнтів відбивання (а), пропускання (б) та відбивання зі сторони підкладки (в) нанорозмірних плівок срібла з різними товщинами: 1 – 0,7 нм; 2 – 1 нм; 3 – 1,3 нм; 4 – 1,7 нм

На рис. 3.2 наведені приклади спектральних залежностей коефіцієнтів відбивання, пропускання та відбивання зі сторони підкладки для товщини плівок срібла в діапазоні товщин від 3,5 до 15 нм.

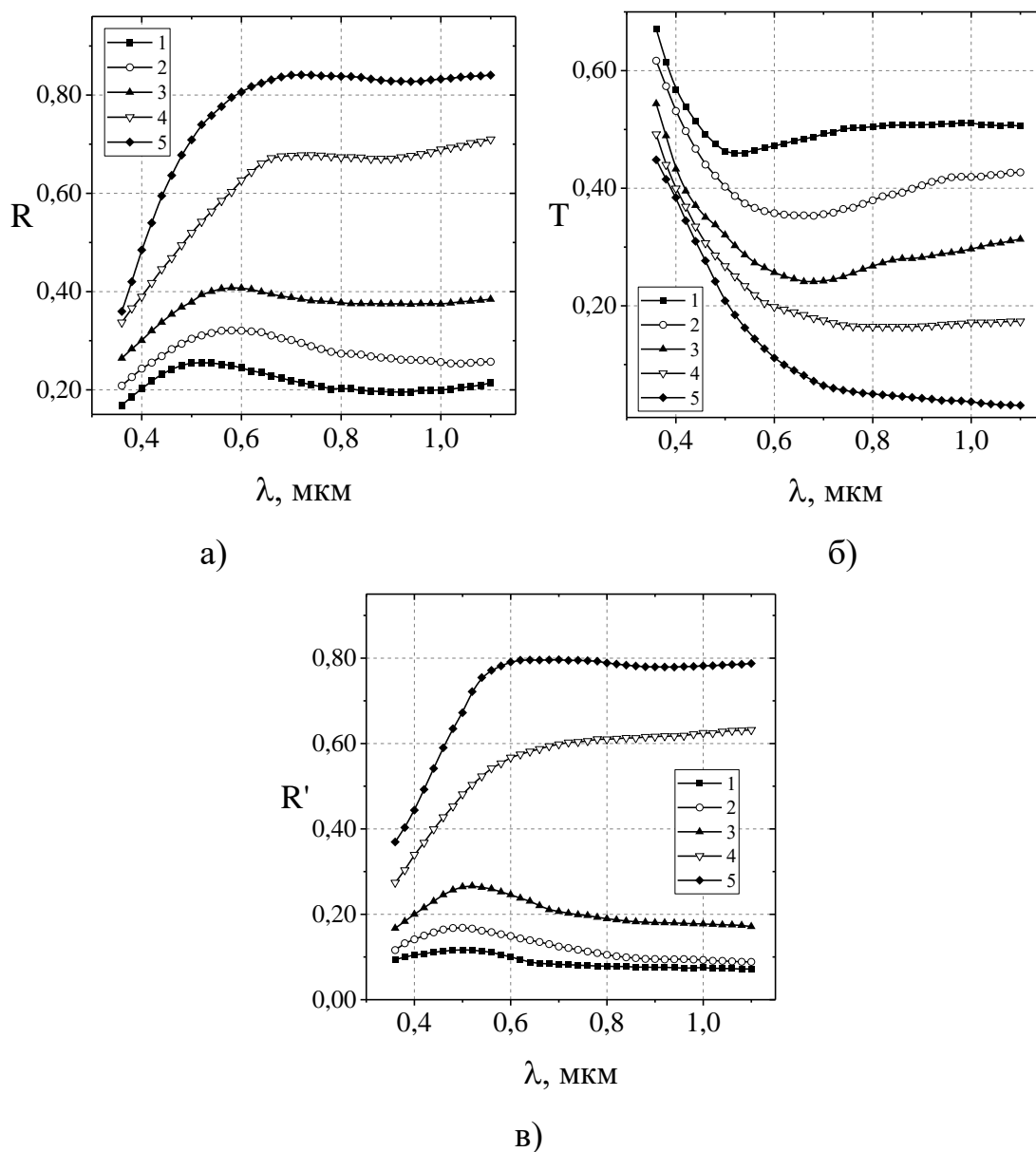


Рис. 3.2. Спектральні залежності коефіцієнтів відбивання (а), пропускання (б) та відбивання зі сторони підкладки (в) нанорозмірних плівок срібла з різними товщинами: 1 – 3,5 нм; 2 – 4 нм; 3 – 8 нм; 4 – 12 нм; 5 – 15 нм

З наведених даних (рис. 3.1, рис. 3.2) видно, що зі збільшенням товщини плівки спостерігається зменшення коефіцієнта пропускання і збільшення коефіцієнта відбивання. Для плівок усіх розмірів спостерігається дисперсія R , T ,

R' в досліджуваній області спектру. На спектральних залежностях коефіцієнту пропускання спостерігається значний мінімум, який при зменшенні товщини плівки срібла від 15 до 0,7 нм зміщується поблизу інтервалу довжин хвиль від 0,55 мкм до 0,45 мкм. Зазначений мінімум не виражений для плівок з товщиною понад 10 нм.

На спектрах відбиття спостерігаються смуги поблизу довжин хвиль, характерних для спектрів пропускання. Слід зазначити, що зі зменшенням вагової товщини нанорозмірних плівок смуги на спектральних залежностях стають менш вираженими.

Таким чином, отримані експериментальні значення R , T , R' нанорозмірних плівок срібла можна використовувати для визначення оптичних параметрів нанорозмірних компонент, із застосуванням запропонованих в розділі 2 методів.

3.2.2. Електронно-мікроскопічні дослідження

Оптичні властивості нанорозмірних плівок металів в основному визначаються їх мікроструктурою. Тому, при вивченні оптичних властивостей плівок одним з основних завдань являється визначення їх мікроструктури. Визначення параметрів структури нанорозмірних плівок (розміру, форми, поверхневої концентрації частинок), проводилося методами електронно-мікроскопічних досліджень. Морфологічна структура і фазовий склад плівок металів вивчалися методом просвічуючої та растрової електронної мікроскопії [92].

На рис. 3.3 наведено приклад електронно-мікроскопічного знімка мікроструктури зразка нанорозмірної плівки срібла.

Результати електронно-мікроскопічних досліджень нанорозмірних плівок срібла, показали, що плівки з ваговою товщиною близько до 15 нм мають перервну структуру, а при товщині менше 4 нм – острівкову структуру. При подальшому зростанні вагової товщини в плівках спостерігалася суцільна структура. Ці результати корелюють з даними, наведеними в роботі [94].

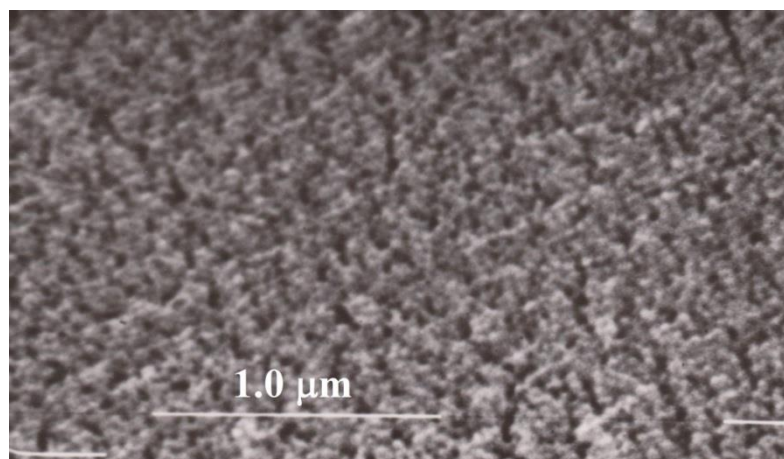


Рис. 3.3. Електронно-мікроскопічний знімок зразка нанорозмірної плівки срібла товщиною 12 нм на скляній підкладці

Електронно-мікроскопічні дослідження показали, що нанорозмірні плівки хрому мають острівкову неоднорідну структуру, а форма близька до сферичної. Визначено, що нанорозмірні частинки хрому мають діаметр $D_0 = 2,5 \div 6,5$ нм з поверхневою концентрацією $N_0 = (1 \div 4,6) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 3.4. наведено приклад електронно-мікроскопічного знімку структури досліджених плівок хрому.

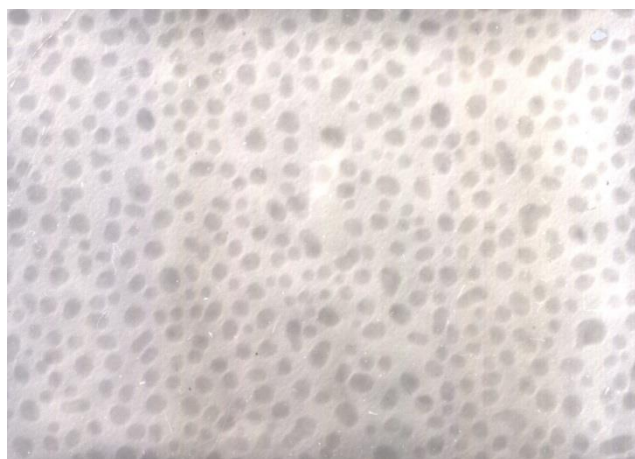


Рис. 3.4. Електронно-мікроскопічний знімок зразка нанорозмірної плівки хрому товщиною 1,5 нм на скляній підкладці

З результатів досліджень виходить, що для часток хрому при зміні вагової товщини від 0,5 нм до 1,7 нм, N_0 зменшується від $4,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ до $3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Аналіз електронно-мікроскопічних знімків показав, що плівки хрому стають суцільними при ваговій товщині більше 3,0 нм.

Узагальнення результатів мікроструктурних досліджень нанорозмірних плівок міді, представлених нами у роботі [92] сформованих методом магнетронного розпилення, показало, що плівки з ваговою товщиною близько до 18 нм мають гранульовану (перервну) структуру, а при товщині менше 4 нм – острівкову структуру. При подальшому зростанні вагової товщини в плівках спостерігалася суцільна структура. Ці результати корелюють з даними, наведеними в роботі [94].

3.2.3. Дослідження нанорозмірних діелектричних шарів

Так як в багатошарових металодіелектричних структурах для підвищення їх експлуатаційної стабільності в якості бар'єрних шарів застосовуються острівкові плівки хрому сумісно з різними діелектричними матеріалами, представляє доцільним оцінити вплив на значення ЕМ параметрів нанорозмірних компонент оточуючого середовища [95-99]. Зокрема, перспективними матеріалами для використання в металодіелектричних структурах є оксиди алюмінію Al_2O_3 та кремнію SiO_2 . У зв'язку з цим, проведено дослідження металодіелектричних структур – острівкова плівка хрому з ваговою товщиною менше 1 нм зосереджених між діелектричними шарами Al_2O_3 , SiO_2 , відповідно з різними значеннями діелектричної проникливості ϵ_m . Для визначення ЕМ параметрів нанорозмірних частинок хрому в середовищі Al_2O_3 , (SiO_2) застосовано метод, визначення ЕМ параметрів нанорозмірних частинок у складі багатошарової системи (див. розділі 2). Приклади результатів експериментальних досліджень комплексної діелектричної проникливості нанорозмірних компонент хрому в діелектричному середовищі представлені на рис. 3.5.

Звідси слідує, що на значення оптичних параметрів нанорозмірних частинок досліджуваних металів в значній мірі залежать від їх розміру, а також від властивостей оточуючого середовища, зокрема діелектричної проникності.

Результати електронно-мікроскопічних досліджень дозволяють стверджувати, що досліджувані зразки представляють нанокompозити типу Cr – Al₂O₃, Cr – SiO₂ з неоднорідним розподілом нанорозмірних частинок. Разом з тим, як показано в розділі 3.2.2, мікроструктура та властивості компонент таких композитів визначаються технологічними умовами процесу їх формування, що відкриває можливість для прогнозованого регулювання їх оптичних властивостей [85].

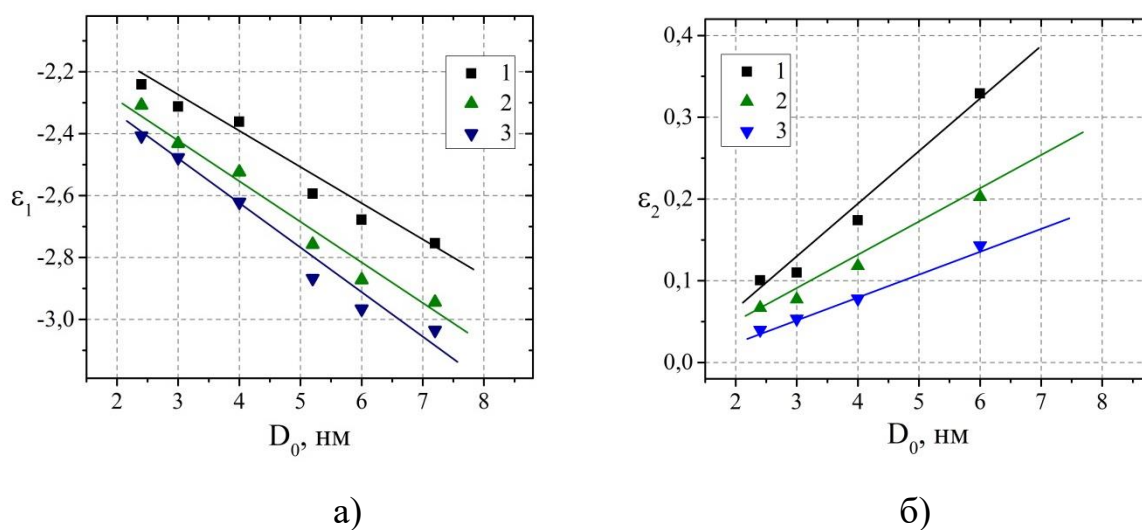


Рис. 3.5. Розмірні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин питомої комплексної діелектричної проникності нанорозмірних компонент хрому в шаруватих металодіелектричних структурах при різних значеннях діелектричної проникливості діелектрика ε_m : 1 – $\varepsilon_m = 1,45$; 2 – $\varepsilon_m = 1,8$; 3 – $\varepsilon_m = 2,2$

3.3. Результати досліджень оптичних параметрів нанорозмірних компонентів селективних структур

Запропонована методика визначення комплексної діелектричної проникності нанорозмірних компонентів в наноструктурних системах заснована на спектрофотометричних і електронно-мікроскопічних дослідженнях на нанодисперсних системах та модифікованій моделі електромагнітного відгуку металодіелектричної наноструктурної системи з урахуванням мікроструктурних параметрів (див. розділ 2.1). В якості вхідних даних для визначення

експериментальних даних комплексної діелектричної проникності нанорозмірних компонент використовуються результати спектрофотометричних вимірів спектральних залежностей T , R і R' та електронно-мікроскопічних досліджень параметрів мікроструктури металодіелектричних нанодисперсних систем.

На рис. 3.6 представлені спектральні залежності комплексної діелектричної проникності нанорозмірних плівок срібла з різними товщинами, розраховані на основі даних представлених в розділі 3.2.1.

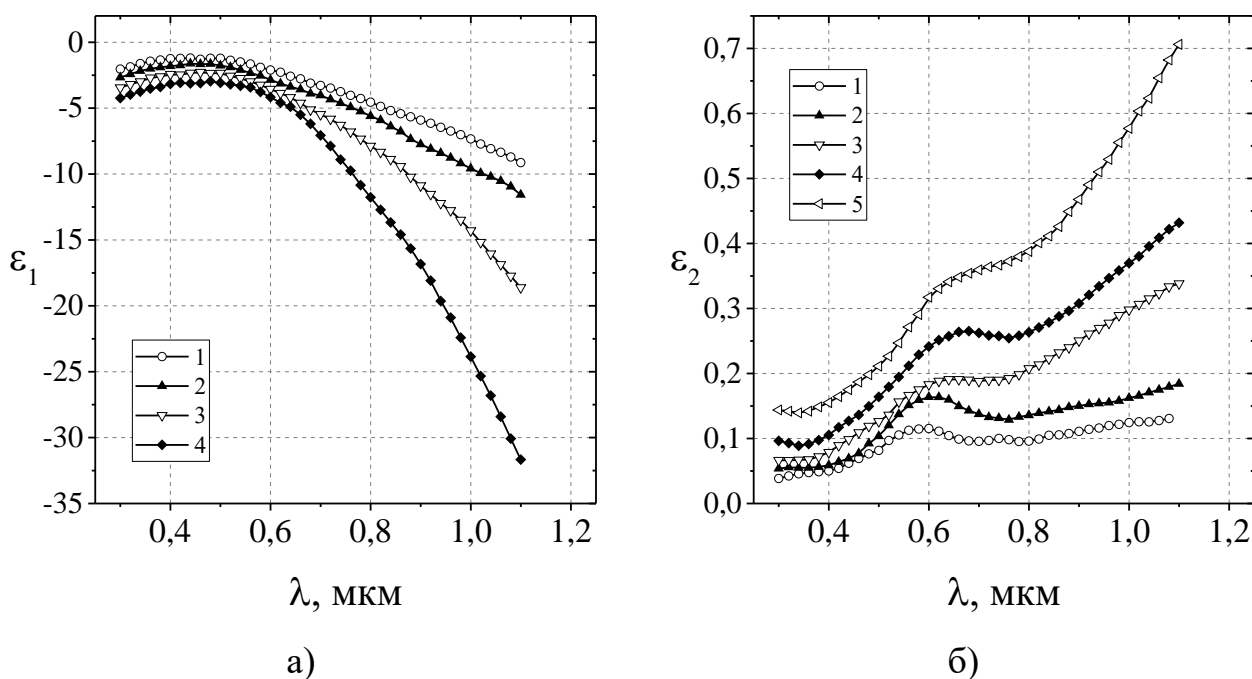


Рис. 3.6. Спектральні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин комплексної діелектричної проникності нанорозмірних плівок срібла з різними товщинами:

1 – 1 нм; 2 – 4 нм; 3 – 12 нм; 4 – 15 нм; 5 – 36 нм

З приведених даних видно, що для нанорозмірних плівок срібла значення уявної частин комплексної діелектричної ε_2 різко падають при зменшенні розміру частинок, а величини дійсної комплексної діелектричної ε_1 для всіх плівок срібла з розмірами від 1 до 36 нм мають негативні значення. На дисперсійних кривих ε_2 срібла в спектральному інтервалі $\lambda = 0,32 \div 0,83$ мкм спостерігається складна смуга, яка складається по меншій мірі з трьох піків з максимумами відповідно при $0,35 \div 0,38$, $0,55 \div 0,58$ і $0,75$ мкм.

Для порівняння виконані розрахунки ε_1 і ε_2 “масивного” (в макроскопічних об’ємах) срібла за зазначеннями, що представлені в роботі [100]. Результати порівняння діелектричної проникності нанорозмірної плівки срібла з товщиною 3,5 нм з діелектричною проникністю срібла в макроскопічному об’ємі представлені рис. 3.7.

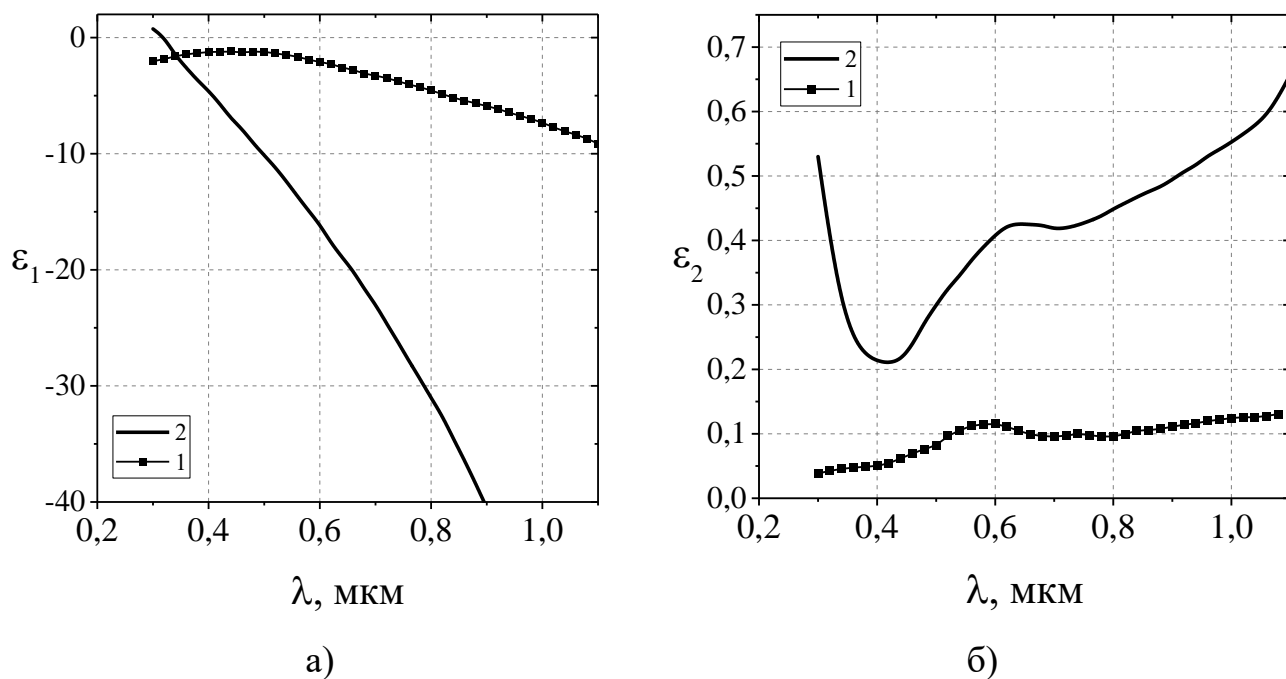


Рис. 3.7. Спектральні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин комплексної діелектричної проникності: 1 – нанорозмірної плівки срібла з товщиною 3,5 нм; 2 – срібла в макроскопічному об’ємі [100]

Порівняння спектральних залежностей уявних частин комплексних діелектричних проникностей властивих нанорозмірним плівкам срібла з відповідними їм залежностями характерними масивному металу показує, що вони якісно подібні. Відмінності спостерігаються в підсиленні наявних смуг в випадку нанорозмірних плівок срібла. При цьому маємо зміщення максимуму піків характерних смуг в високочастотну область при зменшенні їх об’єму. Також для спектральних залежностей ε_1 характерні якісні відмінності. Таким чином, підтверджується необхідність використовувати значення оптичних параметрів нанорозмірних компонент нанокомпозитних структур отриманих на основі

експериментально-аналітичних дослідження при проектуванні та розробці оптично селективних елементів.

3.4. Апроксимаційні моделі оптичних характеристик нанорозмірних металевих плівок

На основі даних про спектральні залежності оптичних параметрів нанорозмірних компонентів досліджуваних металів встановлені їх апроксимаційні математичні співвідношення. Такі аналітичні представлення являються необхідними для моделювання та достовірного прогнозування важливих в практичному застосуванні оптичних характеристик нанокомпозитних металодіелектричних систем на їх основі.

Для створення апроксимаційної моделі був застосований алгоритм Левенберга-Марквардта, який направлений на визначення в більшості випадків поліноміальних виразів [101, 102]. Розглянемо апроксимаційні математичні моделі оптичних параметрів, зокрема діелектричної провідності, нанорозмірних плівок срібла.

Дійсну та уявну частини комплексної діелектричної проникності нанорозмірних плівок срібла за умови $0,3 \leq \lambda \leq 2$ (мкм), та $1 \leq w \leq 35$ (нм) (де w – товщина плівки) можна описати аналітичними функціями:

$$\varepsilon_1 = z_0 + a_1 \cdot \lambda + b_1 \cdot w + a_2 \cdot \lambda^2 + b_2 \cdot w^2 + c_1 \cdot \lambda w \quad (3.2)$$

де коефіцієнти $z_0, a_1, a_2, b_1, b_2, c_1$, значення яких наведені в табл. 3.1.,

λ – довжина хвилі ЕМ випромінювання [мкм], w – вагова товщина [$10^{-3} \cdot$ мкм].

Таблиця 3.1

Значення коефіцієнтів, які використано в апроксимаційному співвідношенні (3.2)

коефіцієнт	z_0	a_1	a_2	b_1	b_2	c_1
значення	-19,083	47,889	-34,068	1,691	$-0,045 \cdot 10^{-4}$	-2,102
розмірність	–	мкм ⁻¹	мкм ⁻²	$10^3 \cdot$ мкм ⁻¹	$10^6 \cdot$ мкм ⁻²	$10^3 \cdot$ мкм ⁻²

$$\varepsilon_2 = z_0 + a_1 \cdot \lambda + b_1 \cdot w + a_2 \cdot \lambda^2 + b_2 \cdot w^2 + c_1 \cdot \lambda w \quad (3.3)$$

де коефіцієнти $z_0, a_1, a_2, b_1, b_2, c_1$, значення яких наведені в табл. 3.2.,

λ – довжина хвилі ЕМ випромінювання [мкм], w – вагова товщина [$10^{-3} \cdot$ мкм].

Таблиця 3.2

Значення коефіцієнтів, які використано в апроксимаційному співвідношенні (3.3)

коефіцієнт	z_0	a_1	a_2	b_1	b_2	c_1
значення	0,102	-0,021	- 0,011	-2,13	$1,682 \cdot 10^{-4}$	0,018
розмірність	–	мкм ⁻¹	мкм ⁻²	$10^3 \cdot$ мкм ⁻¹	$10^6 \cdot$ мкм ⁻²	$10^3 \cdot$ мкм ⁻²

Коефіцієнт детермінації (\bar{z}) для апроксимаційної моделі ε_1 має значення $\bar{z} \geq 0,82$, а для ε_2 $\bar{z} \geq 0,85$ в заданих діапазонах змінних λ, w .

Оскільки при таких обмеження за допомогою виразів (3.2) та (3.3) на основі поліному не вдалося забезпечити необхідної точності були використана складніша функція:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 = z_0 + a_1 \cdot \lambda + a_2 \cdot \lambda^2 + a_3 \cdot \lambda^3 + a_4 \cdot \lambda^4 + a_5 \cdot \lambda^5 + \\ + b_1 \cdot w + b_2 \cdot w^2 + b_3 \cdot w^3 + b_4 \cdot w^4 + b_5 \cdot w^5 \end{aligned} \quad (3.4)$$

де

коефіцієнти $z_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$, значення яких наведені в табл. 3.3.,

λ – довжина хвилі ЕМ випромінювання [мкм], w – вагова товщина [$10^{-3} \cdot$ мкм].

Таблиця 3.3

Значення коефіцієнтів, які використано в апроксимаційному співвідношенні (3.4)

коефіцієнт	z_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
значення	-54,257	-4,786	133,083	-323,178	268,557	-80,506
розмірність	–	мкм ⁻¹	мкм ⁻²	мкм ⁻³	мкм ⁻⁴	мкм ⁻⁵
коефіцієнт		b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
значення		40,054	-11,034	1,429	-8,729	2,018
розмірність		$10^3 \cdot$ мкм ⁻¹	$10^6 \cdot$ мкм ⁻²	$10^9 \cdot$ мкм ⁻³	$10^{12} \cdot$ мкм ⁻⁴	$10^{15} \cdot$ мкм ⁻⁵

$$\varepsilon_2 = z_0 + a_1 \cdot \lambda + a_2 \cdot \lambda^2 + a_3 \cdot \lambda^3 + a_4 \cdot \lambda^4 + a_5 \cdot \lambda^5 + b_1 \cdot w + b_2 \cdot w^2 + b_3 \cdot w^3 + b_4 \cdot w^4 + b_5 \cdot w^5 \quad (3.5)$$

де

коефіцієнти $z_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$, значення яких наведені в табл. 3.4., λ – довжина хвилі ЕМ випромінювання [мкм], w – вагова товщина [$10^{-3} \cdot$ мкм].

Таблиця 3.4

Значення коефіцієнтів, які використано в апроксимаційному співвідношенні (3.5)

коефіцієнт	z_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
значення	2,151	-19,664	63,621	-95,219	67,457	-18,216
розмірність	–	мкм ⁻¹	мкм ⁻²	мкм ⁻³	мкм ⁻⁴	мкм ⁻⁵
коефіцієнт		b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
значення		0,034	-0,005	$3,761 \cdot 10^{-4}$	$-1,155 \cdot 10^{-5}$	$1,278 \cdot 10^{-7}$
розмірність		$10^3 \cdot$ мкм ⁻¹	$10^6 \cdot$ мкм ⁻²	$10^9 \cdot$ мкм ⁻³	$10^{12} \cdot$ мкм ⁻⁴	$10^{15} \cdot$ мкм ⁻⁵

Коефіцієнт детермінації (ξ) для апроксимаційної моделі ε_1 має значення $\xi \geq 0,95$, а для ε_2 $\xi \geq 0,97$ в заданих діапазонах змінних λ, w .

Висновки до розділу 3

Досліджено нанорозмірні шари срібла на підкладках SiO₂, виготовлені методом вакуумного осадження.

Встановлено особливості їх спектральних залежностей коефіцієнтів пропускання та відбивання в інтервалі $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм. Визначено значення оптичних параметрів нанорозмірних шарів металів на основі результатів спектрофотометричних досліджень експериментальних зразків.

Встановлено апроксимаційні співвідношення дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності нанорозмірних плівок срібла з товщинами від 1 до 35 нм в спектральному діапазоні довжин хвиль $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм, які застосовано в якості вхідних даних рефлекторних шарів срібла при моделюванні оптично селективних елементів.

РОЗДІЛ 4

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАНОРОЗМІРНИХ КОМПОЗИТНИХ ШАРІВ

У розділі 1 показано, що при моделюванні та проектуванні нанокompозитних металодіелектричних структур, для застосування в якості пристроїв різного функціонального призначення, не враховується мікроструктура і морфологія їх перехідних нанорозмірних шарів.

Відомо, що в діапазоні розмірів, починаючи менше 100 нм, властивості металевих частинок стають розмірно залежними [103]. Експериментальна інформація стосовно матеріалів, які використовуються для таких нанокompозитних металодіелектричних структур обмежена та отримана при значних припущеннях, щодо їх мікроструктури. Крім того, не існує теорій, які дозволили б достовірно описати відгук таких структур на електромагнітний вплив і пояснити їх специфічні механізми та ефекти фотопоглинання [104]. Тому, відомості про оптичні параметри металевих наночастинок не однозначні та суперечливі [105]. Отже, при розробці математичних моделей доцільно використовувати достовірні експериментальні характеристики нанокompозитних металодіелектричних структур для створення апроксимаційних моделей їх електромагнітного відгуку.

Тому в рамках наших досліджень необхідно розробити апроксимаційні співвідношення на основі результатів наших експериментальних досліджень, які дають можливість описати вплив мікроструктури та морфології нанорозмірних шарів металодіелектричних структур на їх оптичні характеристики.

4.1. Результати числового моделювання оптичних параметрів нанорозмірних композитних структур на основі хрому

В даному розділі проведено числове моделювання оптичного відгуку нанорозмірних композитних структур $\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$, Cr/SiO_2 , $\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ на електромагнітний вплив з врахуванням їх мікроструктури, морфології та

проведено порівняльний аналіз. На основі отриманих результатів розроблено апроксимаційні моделі, що дасть можливість підвищити точність моделювання та проектування пристроїв різного функціонального призначення.

Необхідно зазначити, що перехідні шари типу $\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$, Cr/SiO_2 , $\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ представляють собою нанокompозитну структуру, яка характеризується ефективною комплексною діелектричною проникністю $\varepsilon_{\text{ef}} = \varepsilon_{\text{ef1}} - i\varepsilon_{\text{ef2}}$.

Числове моделювання проведено з використанням методу описаному в розділі 2.3.

В якості вихідних даних при числовому моделюванні оптичних параметрів використовуються апроксимаційні моделі нанорозмірних компонент хрому, які були розроблені та представлені в роботах [85, 106].

Результати числового моделювання спектральних характеристик ефективної комплексної діелектричної проникності досліджуваних композитних структур представлені на рис. 4.1 - рис. 4.3.

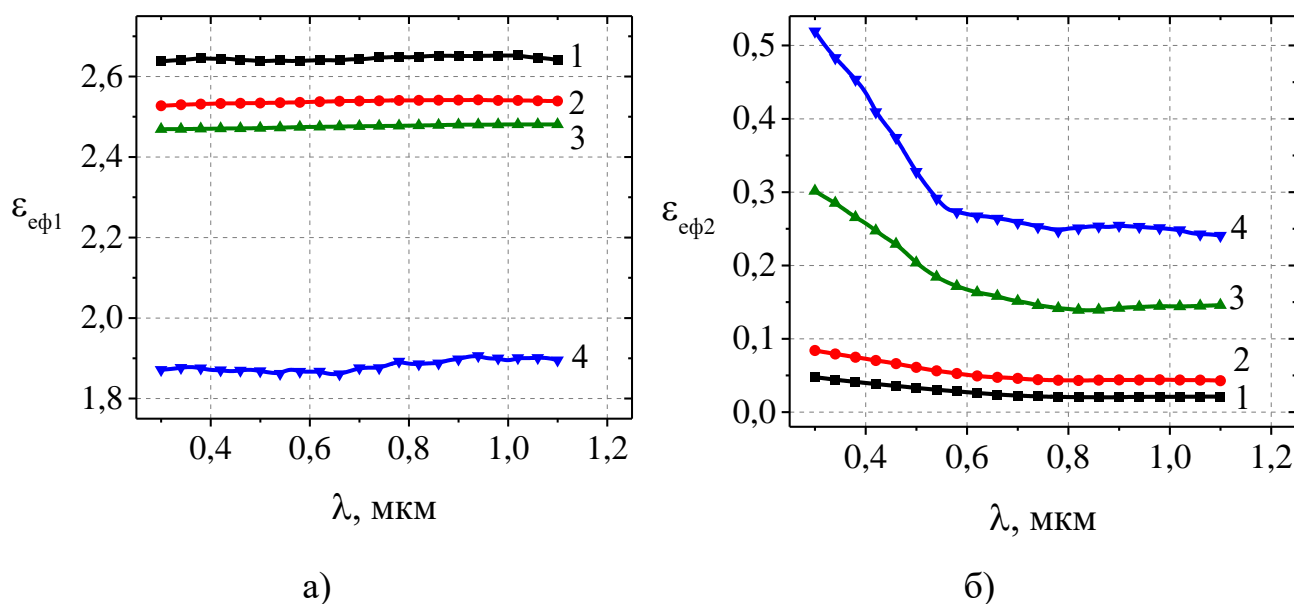


Рис. 4.1. Спектральні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин комплексної ефективної діелектричної проникності композитного шару Cr/SiO_2 розраховані на основі значень комплексної діелектричної проникності включень хрому [107] з фактором заповнення v : 1 – 0,15; 2 – 0,21; 3 – 0,26; 4 – 0,53

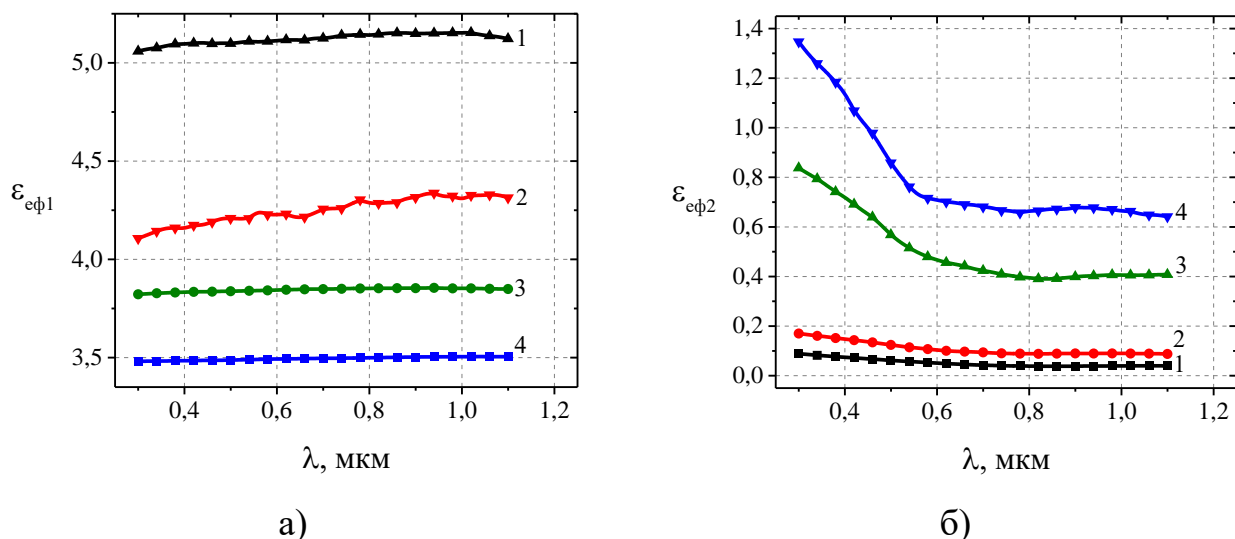


Рис. 4.2. Спектральні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин комплексної ефективної діелектричної проникності композитного шару Cr/Al₂O₃ розраховані на основі значень комплексної діелектричної проникності включень хрому [107] з фактором заповнення v : 1 – 0,18; 2 – 0,21; 3 – 0,32; 4 – 0,52

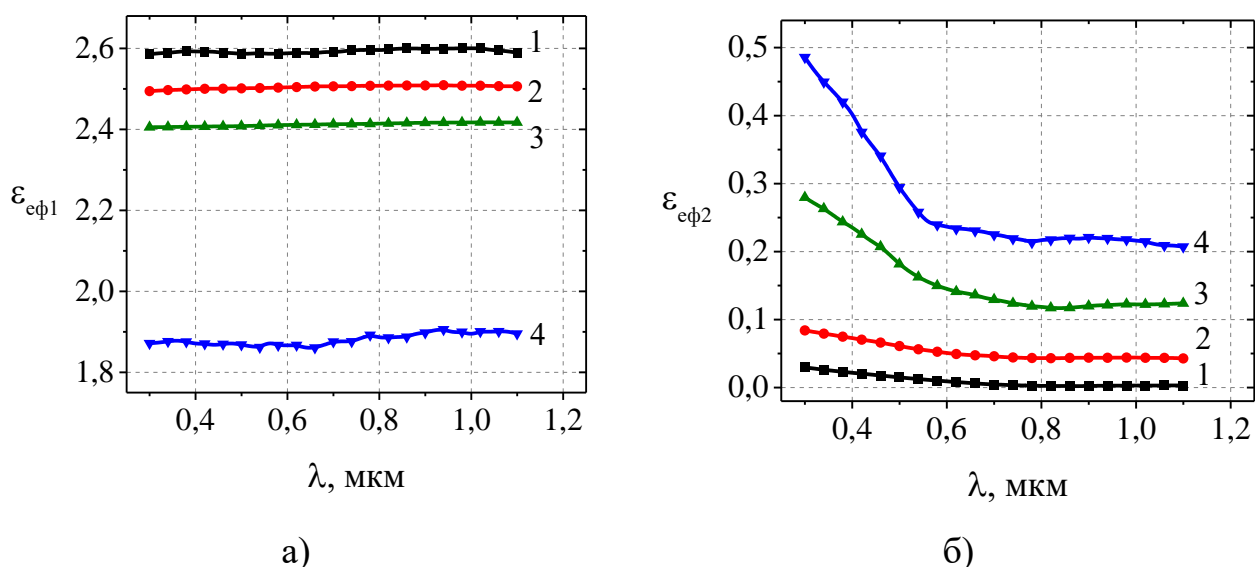


Рис. 4.3. Спектральні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин комплексної ефективної діелектричної проникності композитного шару Cr/Cr₂O₃ розраховані на основі значень комплексної діелектричної проникності включень хрому [107] з фактором заповнення v : 1 – 0,17; 2 – 0,24; 3 – 0,31; 4 – 0,54

Як видно з результатів представлених на рис. 4.1- рис. 4.3, врахування мікроструктури та морфології нанорозмірних композитних структур дозволяє

керувати їх оптичними параметрами, зокрема ефективною діелектричною проникністю.

Для розрахунку спектральних характеристик нанорозмірних плівок металів зазвичай використовують значення характерні для макроскопічних матеріалів. Проте відомо, що при таких розмірах оптичні параметри мають розмірну залежність, тому з метою уточнення правомірності використання даного підходу для оцінки електромагнітного відгуку нанорозмірних структур, нами проведено модельний експеримент, результати якого представлені нижче. На рис. 4.4 та 4.5 представлені спектральні залежності дійсної та уявної частин комплексної ефективною діелектричної проникності композитних модельних покриттів, які розраховані за значеннями оптичних параметрів характерних для хрому в макроскопічних об'ємах [108].

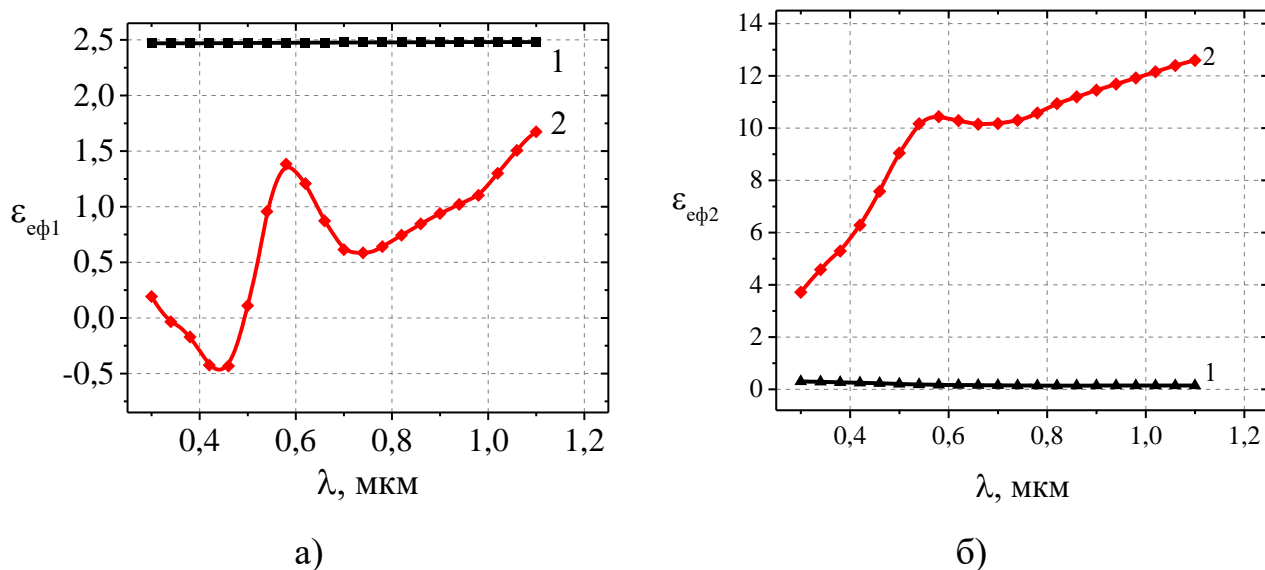


Рис. 4.4. Спектральні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин комплексної ефективною діелектричної проникності композитного шару Cr/SiO₂: 1 – розрахунок на основі значень комплексної діелектричної проникності включень хрому з фактором заповнення $v = 0,25$; 2 – розрахунок на основі значень комплексної діелектричної проникності включень характерних для макроскопічних об'ємів хрому

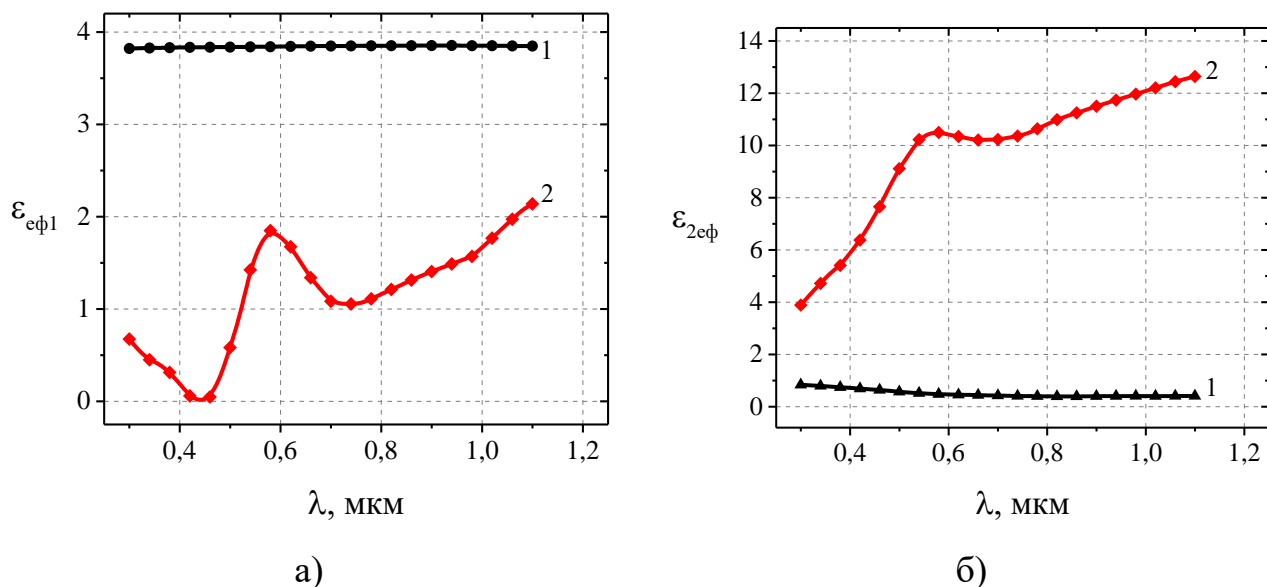


Рис. 4.5. Спектральні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин комплексної ефективної діелектричної проникності композитного шару Cr/Al₂O₃: 1 – розрахунок на основі значень комплексної діелектричної проникності включень хрому з фактором заповнення $\nu = 0,28$; 2 – розрахунок на основі значень комплексної діелектричної проникності включень характерних для макроскопічних об'ємів хрому

Видно, що спектральна залежність коефіцієнта поглинання модельного покриття розрахованого на основі експериментальних значень параметрів нанорозмірних включень хрому та спектральна характеристика для модельного нанокompозитного покриття розрахована при умові, що параметри металевих нановключень мають значення характерні для макроскопічних об'ємів металу значно відрізняються.

Як було зазначено в розділі 1 при розробці та проектуванні оптично селективних елементів на практиці, як правило, використовують значення характерні матеріалам в макроскопічних об'ємах.

На рис. 4.6. представлені спектральні залежності коефіцієнтів відбивання (а) та пропускання (б) композитного шару Cr/SiO₂. Крива 1, розрахована на основі оптичних параметрів нанорозмірних плівок хрому визначених нами за допомогою експериментально-аналітичного методу і представлених в [106, 109]. Крива 2 –

коефіцієнти відбивання та пропускання модельних нанорозмірних плівок, оцінених на основі оптичних параметрів макроскопічних матеріалів [108]. Для порівняння на рис. 2 наведена експериментальна крива 3 – для нанорозмірної плівки хрому з структурними параметрами відповідно до параметрів, використаних для модельного експерименту.

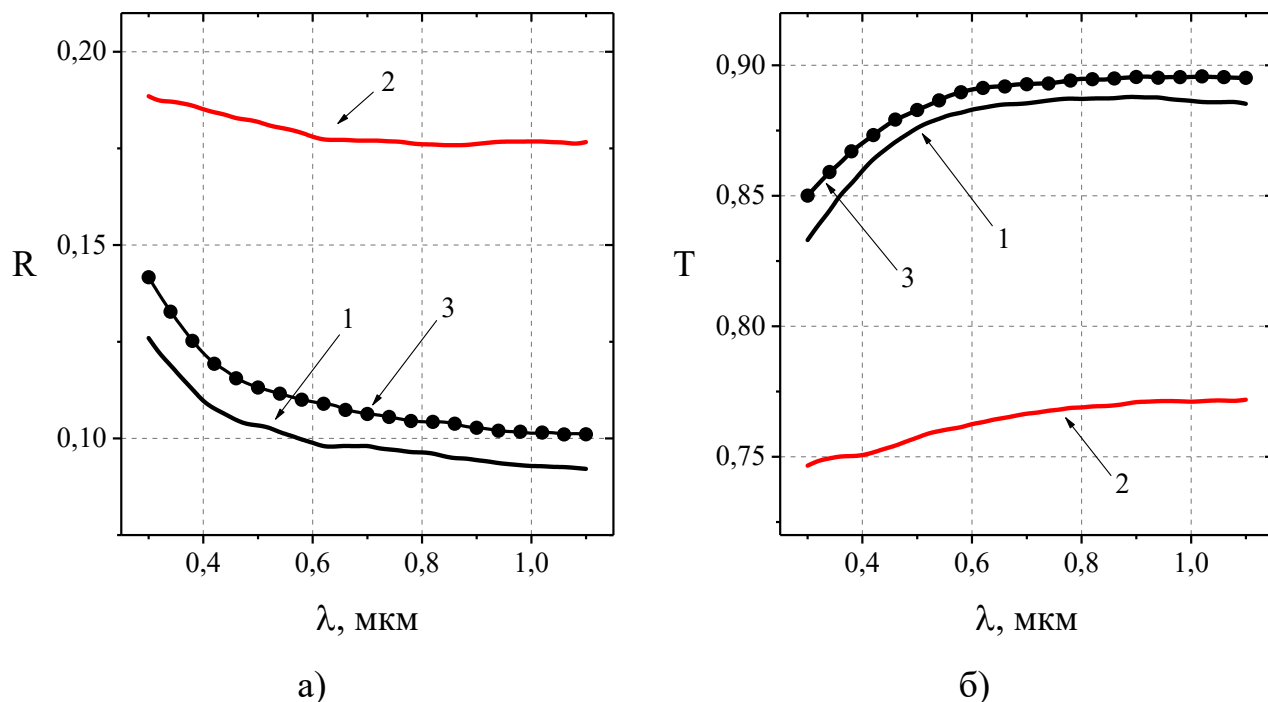


Рис. 4.6. Спектральні залежності коефіцієнтів відбивання (а) та пропускання (б) композитного шару Cr/SiO₂: 1 – розрахунок на основі значень ефективної комплексної діелектричної проникності композиту Cr/SiO₂ зі значення фактором заповнення металу $\nu = 0,21$; 2 – розрахунок на основі значень ефективної комплексної діелектричної проникності модельного композиту Cr/SiO₂ визначених при умові, що оптичні параметри включень хрому мають значення властиві макроскопічним об'ємам; 3 – експериментальна залежність

Видно, що різниця між значеннями розрахованими на основі оптичних параметрів для нанорозмірних плівок та експериментальними лежить в межах обчислювальної похибки 2-3%. А використання значень оптичних параметрів з врахуванням встановлених розмірних апроксимаційних залежностей в порівнянні з результатами, одержаним на основі значень характерних для макроскопічних

об'ємів матеріалів підвищує точність розрахунків до 15% для T та 40% для R . Це підтверджує доцільність використання експериментальних оптичних параметрів нанорозмірних металевих включень для прогнозування електромагнітного відгуку нанокомпозитних структур.

4.2. Поглинання та розсіювання електромагнітного випромінювання нанорозмірними компонентами композитних структур

При дослідженні композитних структур на основі нанорозмірних компонент необхідно враховувати, що фотопоглинання в них визначаються не лише механізмами поглинання, але і розсіювання електромагнітної енергії. Процеси поглинання та розсіювання дисперсним середовищем електромагнітної енергії в оптичному діапазоні спектру характеризуються, зокрема питомим поглинанням β окремого нанорозмірного компонента. Згідно [110] β задається співвідношенням:

$$\beta = \frac{K_n}{K_p} \quad (4.1)$$

де K_n – фактор ефективності поглинання; K_p – фактор ефективності розсіювання.

Відповідно до теорії Мі [111, 112] фактори ефективності поглинання K_n і розсіювання K_p нанорозмірного компонента визначаються наступними виразами:

$$K_n = \frac{4\pi}{3} \frac{D_0}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_m} \alpha_2 \quad (4.2)$$

$$K_p = \frac{8}{27} \frac{\pi^4 D_0^4}{\lambda^4} \sqrt{\varepsilon_m} (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) \quad (4.3)$$

де D_0 – розмір металевого компонента, ε_m – діелектрична проникність середовища, λ – довжина хвилі світла, α_1 , α_2 – дійсна і уявна частини питомої комплексної електричної поляризованості компонента.

Вирази (4.2) та (4.3) справедливі при наступних наближеннях:

- форма включення – сферична;
- розмір включення багато менше довжини електромагнітної хвилі в даному середовищі ($D_0 \ll \lambda$) – дипольне наближення;
- металеві включення хаотично розподілені по об'єму діелектричної матриці;

- об'ємна концентрація включення мала, а відстань між частинками набагато перевищує їх розміри (система невзаємодіючих елементів).

Відповідно до класичної електромагнітної теорії [113] при зазначених наближеннях комплексна питома електрична поляризованість частки дається співвідношеннями:

$$\alpha_1 = \frac{3[(\varepsilon_1 - \varepsilon_m)(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_m) + \varepsilon_2^2]}{(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_m)^2 + \varepsilon_2^2} \quad (4.4)$$

$$\alpha_2 = \frac{9\varepsilon_m \varepsilon_2}{(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_m)^2 + \varepsilon_2^2} \quad (4.5)$$

де $\varepsilon_1 = n^2 - k^2$ – дійсна частина комплексної діелектричної проникності частинки; $\varepsilon_2 = 2nk$ – уявна частина комплексної діелектричної проникності частинки; n, k – відповідно показники заломлення і поглинання частинки.

На підставі співвідношень (4.1)-(4.5) отримані наступні результати спектральних та розмірних залежностей K_p , K_r , β для досліджуваних нанорозмірних включень металів, які представленні на рис. 4.7 - рис. 4.10.

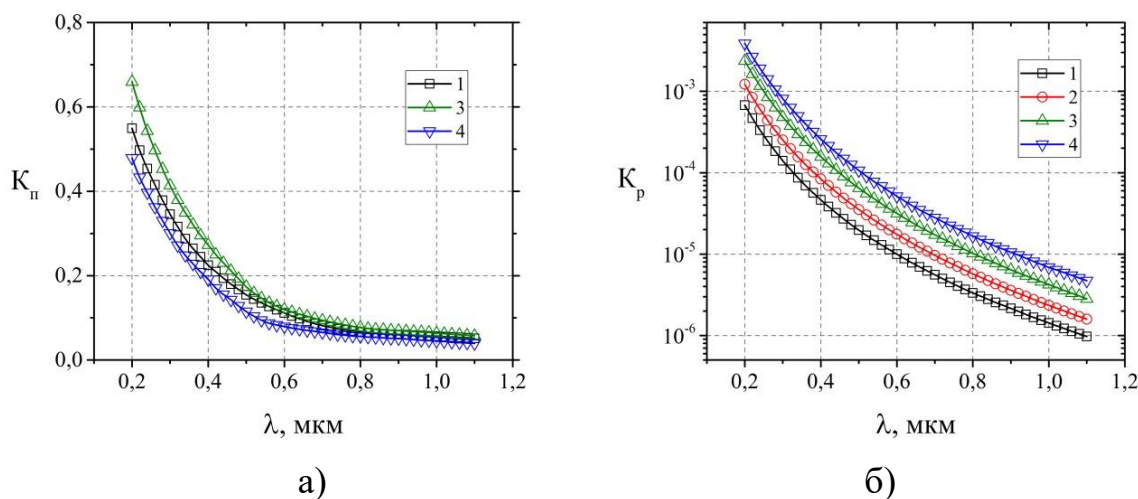


Рис. 4.7. Спектральні залежності факторів ефективності поглинання (а) та розсіювання (б) нанорозмірних компонент хрому при різних значеннях їх розміру:

1 – 2,4 нм; 2 – 3 нм; 3 – 4 нм; 4 – 6 нм

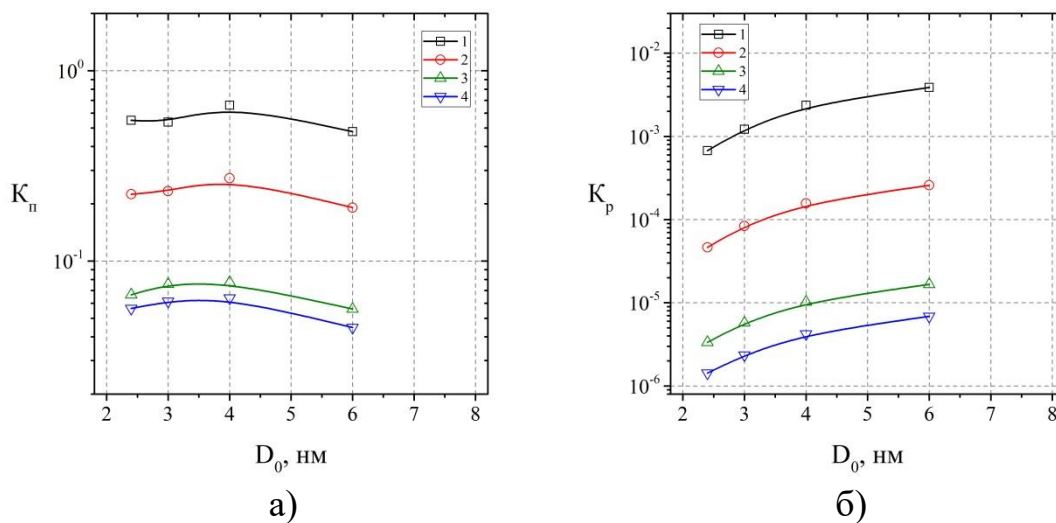


Рис. 4.8. Розмірні залежності факторів ефективності поглинання (а) та розсіювання (б) нанорозмірних компонент хрому при різних значеннях довжини хвилі ЕМ випромінювання λ : 1 – 0,3 мкм, 2 – 0,4 мкм, 3 – 0,8 мкм, 4 – 1 мкм

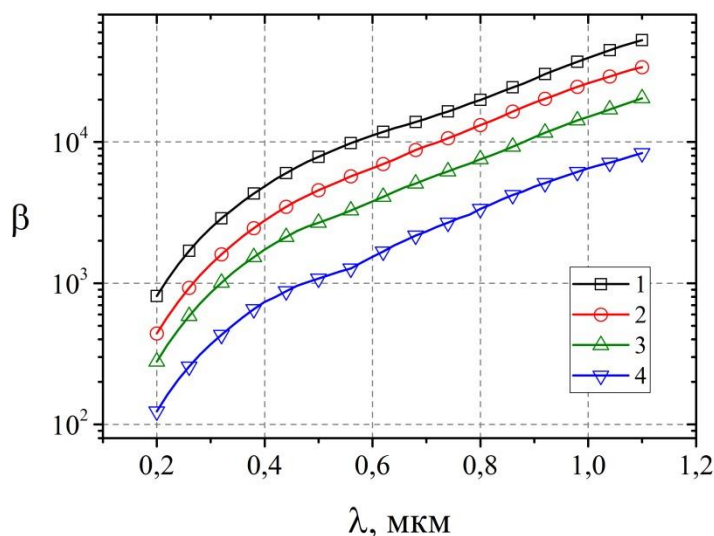


Рис. 4.9. Спектральні залежності питомого поглинання нанорозмірних компонент хрому при різних значеннях їх розміру: 1 – 2,4 нм; 2 – 3 нм; 3 – 4 нм; 4 – 6 нм

Для розрахунку K_n , K_p нанорозмірних включень хрому використовувалися значення комплексної діелектричної проникності наведені в роботі [114], для нанорозмірних включень срібла – представлені в розділі 3.

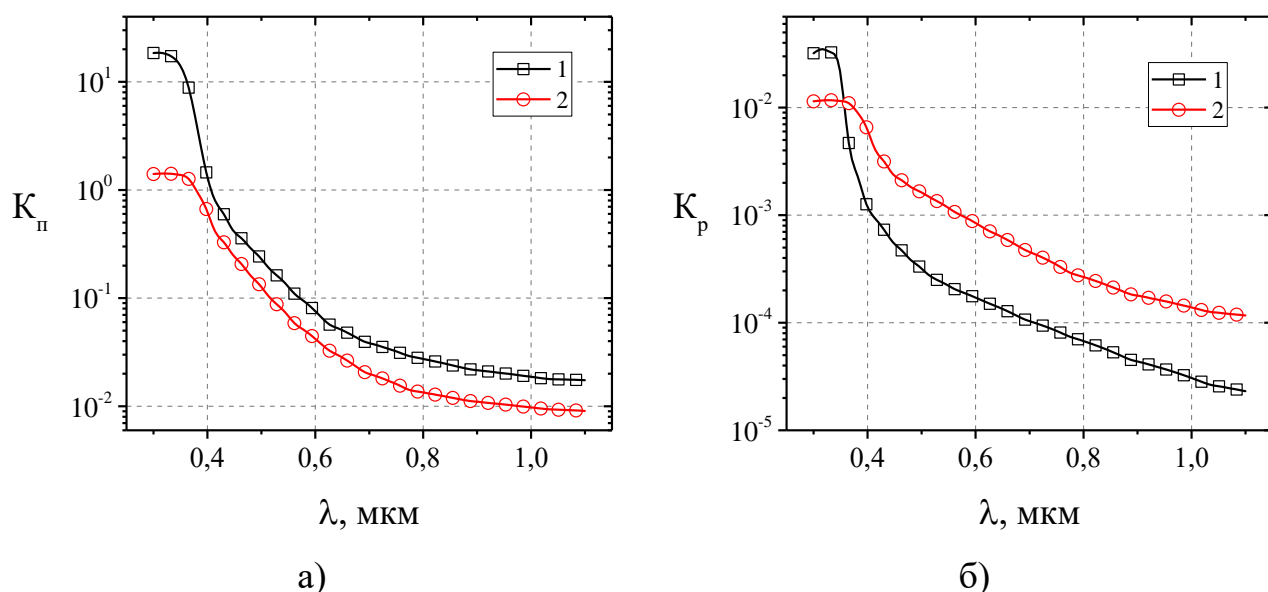


Рис. 4.10. Спектральні залежності факторів ефективності поглинання (а) та розсіювання (б) нанорозмірних компонент срібла при різних значеннях їх розміру: 1 – 1,5 нм; 2 – 8 нм

З результатів досліджень впливу розміру нанорозмірних включень хрому та срібла на явище фотопоглинання в спектральному діапазоні $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм, можна зробити наступний висновок:

- збільшення значень β до одного порядку величини при зменшенні розміру включень в межах від 6 до 2 нм;
- значення K_π , K_p нанорозмірних включень досліджуваних металів корелюють між собою.
- для нанорозмірних частинок з розмірами від 2 до 8 нм основний вклад в зростання β вносить ефект поглинання ($K_\pi \sim 10^0 \div 10^{-1}$) при низькому впливу ефекту розсіювання ($K_p \sim 10^{-2} \div 10^{-6}$);

Таким чином, встановлені закономірності розмірних залежностей оптичних параметрів окремої металевої частинки є доцільними з практичної точки зору для прогнозованого врахування процесів фотопоглинання при формуванні металодіелектричних систем на основі нанорозмірних металевих включень.

4.3. Апроксимаційні моделі оптичних параметрів нанорозмірних композитних шарів

На основі даних результатів числового моделювання, представлених в розділі 4.1 розроблено апроксимаційні моделі спектральної залежності комплексної ефективної діелектричної проникності нанокompозитних шарів. Встановлено апроксимаційну модель дійсної ε_{ef1} та уявної ε_{ef2} частин комплексної ефективної діелектричної проникності структури типу Cr/Al₂O₃ з врахуванням її структурних параметрів для фактору заповнення нанорозмірної компоненти хрому $\nu = 0,18 \div 0,52$ [115], з діелектричною проникністю оточуючого середовища $\varepsilon_m = 2,9$ в спектральному діапазоні $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{ef1}} = z_0 + z \exp\left(-\frac{\lambda}{a} - \frac{\nu}{b}\right); \\ \varepsilon_{\text{ef2}} = z_0 + z \exp\left(-\frac{\lambda}{a} - \frac{\nu}{b}\right). \end{cases} \text{ при } \begin{cases} 0,3 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 2 \text{ мкм} \\ 0,18 \leq \nu \leq 0,52 \end{cases}$$

де λ – довжина хвилі ЕМ випромінювання [мкм], w – вагова товщина [безрозмірна величина], коефіцієнти z_0, z, a, b , значення яких

коефіцієнт	z_0	z	a	b
значення для ε_{ef1}	-2,15	3,65	1,44	18,24
значення для ε_{ef2}	0,03	2,49	0,32	30,79
розмірність	–	–	мкм	–

В даному спектральному діапазоні похибка апроксимаційної моделі не перевищує 2%.

Апроксимаційна модель дійсної ε_{ef1} та уявної ε_{ef2} частин комплексної ефективної діелектричної проникності структури типу Cr/SiO₂ з врахуванням її структурних параметрів для фактору заповнення нанорозмірної компоненти хрому $\nu = 0,15 \div 0,53$ [115], з діелектричною проникністю оточуючого середовища $\varepsilon_m = 2,25$ в спектральному діапазоні $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{эф1}} = z_0 + z \exp\left(-\frac{\lambda}{a} - \frac{v}{b}\right); \\ \varepsilon_{\text{эф2}} = z_0 + z \exp\left(-\frac{\lambda}{a} - \frac{v}{b}\right). \end{cases} \text{ при } \begin{cases} 0,3 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 2 \text{ мкм} \\ 0,15 \leq v \leq 0,53 \end{cases}$$

де λ – довжина хвилі ЕМ випромінювання [мкм], w – вагова товщина [безрозмірна величина], коефіцієнти z_0, z, a, b , значення яких

коефіцієнт	z_0	z	a	b
значення для $\varepsilon_{\text{эф1}}$	-1,98	2,87	1,47	12,24
значення для $\varepsilon_{\text{эф2}}$	0,01	2,09	0,22	29,19
розмірність	–	–	мкм	–

В даному спектральному діапазоні похибка апроксимаційної моделі не перевищує 3%.

Апроксимаційна модель дійсної $\varepsilon_{\text{эф1}}$ та уявної $\varepsilon_{\text{эф2}}$ частин комплексної ефективної діелектричної проникності структури типу Cr/Cr₂O₃ з врахуванням її структурних параметрів для фактору заповнення нанорозмірної компоненти хрому $v = 0,17 \div 0,54$ [115], з діелектричною проникністю оточуючого середовища $\varepsilon_m = 2,17$ в спектральному діапазоні $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{эф1}} = z_0 + z \exp\left(-\frac{\lambda}{a} - \frac{v}{b}\right); \\ \varepsilon_{\text{эф2}} = z_0 + z \exp\left(-\frac{\lambda}{a} - \frac{v}{b}\right). \end{cases} \text{ при } \begin{cases} 0,3 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 2 \text{ мкм} \\ 0,17 \leq v \leq 0,54 \end{cases}$$

де λ – довжина хвилі ЕМ випромінювання [мкм], w – вагова товщина [безрозмірна величина], коефіцієнти z_0, z, a, b , значення яких

коефіцієнт	z_0	z	a	b
значення для $\varepsilon_{\text{эф1}}$	-2,16	3,87	1,27	13,24
значення для $\varepsilon_{\text{эф2}}$	0,03	2,39	0,32	19,19
розмірність	–	–	мкм	–

В даному спектральному діапазоні похибка апроксимаційної моделі не перевищує 2%.

Розроблені апроксимаційні моделі композитних нанорозмірних структур Cr/Al₂O₃, Cr/SiO₂, Cr/Cr₂O₃ з врахуванням експериментальних досліджень нанорозмірних компонент хрому будуть використанні для моделювання та дослідження впливу проміжних композитних нанорозмірних шарів при розробці оптично селективних елементів.

Висновки до розділу 4

Визначено значення ефективної комплексної діелектричної проникності нанокompозитних шарів з діелектричною компонентою (Al₂O₃, SiO₂, Cr₂O₃) та металевою нанорозмірною фазою хрому в спектральному діапазоні $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм з врахуванням оптичних параметрів їх компонент.

Встановлено особливості спектральної зміни дійсної та уявної частини комплексної ефективної діелектричної проникності досліджуваних нанокompозитів зі значеннями фактору заповнення металевої фази хрому від 0,15 до 0,54, що враховано при розробці оптично селективних елементів.

Встановлено апроксимаційні залежності комплексної ефективної діелектричної проникності нанорозмірних композитних шарів Cr/Al₂O₃, Cr/SiO₂, Cr/Cr₂O₃ в спектральному діапазоні $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм, які використано для моделювання та дослідження впливу композитних нанорозмірних шарів на спектральні характеристики оптично селективних елементів.

Запропоновані співвідношення можуть бути застосовані для проектування оптично селективних елементів, прозорих у видимому діапазоні спектру на основі досліджуваних матеріалів.

РОЗДІЛ 5

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ОПТИЧНО СЕЛЕКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ НАНОКОМПОЗИТНИХ СТРУКТУР

У даному розділі наводяться результати дослідження та проектування оптично селективних елементів. А саме:

- моделювання оптичних характеристик наноккомпозитних структур в оптичному діапазоні спектру ЕМ випромінювання;
- визначення інтегральних параметрів запропонованих оптично селективних елементів;
- оптимізація оптичних характеристик модельних елементів;
- порівняння сформованих оптично селективних елементів з існуючими аналогами та представлення перспектив їх застосування.

5.1. Моделювання спектральних оптичних характеристик наноккомпозитних структур

Прогнозування оптично селективних характеристик наноструктурних металодіелектричних систем, в залежності від їх структурних параметрів здійснюється шляхом їх чисельного моделювання на основі алгоритму представленого в розділі 2 з урахуванням особливостей реальної структури та електромагнітних властивостей нанорозмірних компонент.

Для моделювання використовували встановлені на основі експериментальних даних (див. розділ 3 та 4) апроксимаційні залежності нанорозмірних компонент.

Як відзначено в розділі 3, практичний інтерес представляють наноструктурні металодіелектричні покриття на основі нанорозмірних шарів міді. Для чисельного експерименту як модельний зразок вибрано шарувату металодіелектричну структуру на прозорій підкладці на основі нанорозмірних шарів Al_2O_3 , SiO_2 , Cr_2O_3 та нанорозмірних компонент срібла, міді, хрому. Приклад структурної схеми оптичного фільтру наведений на рис. 5.1.

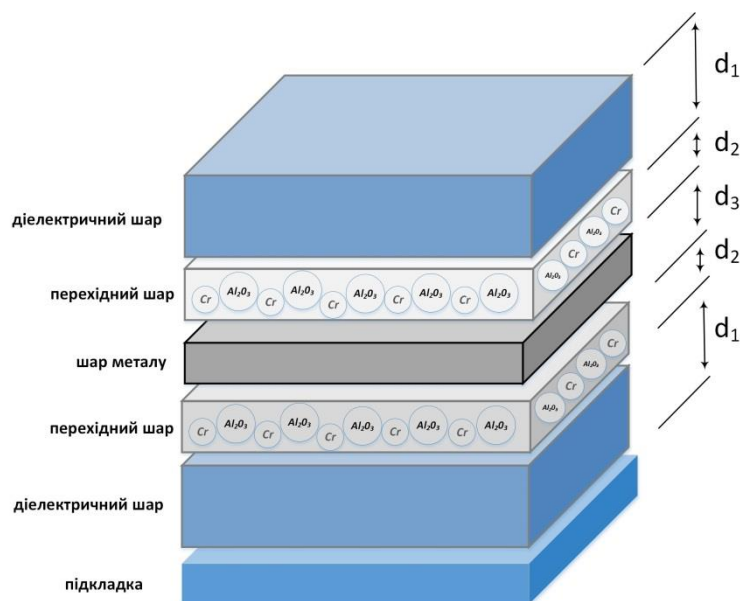
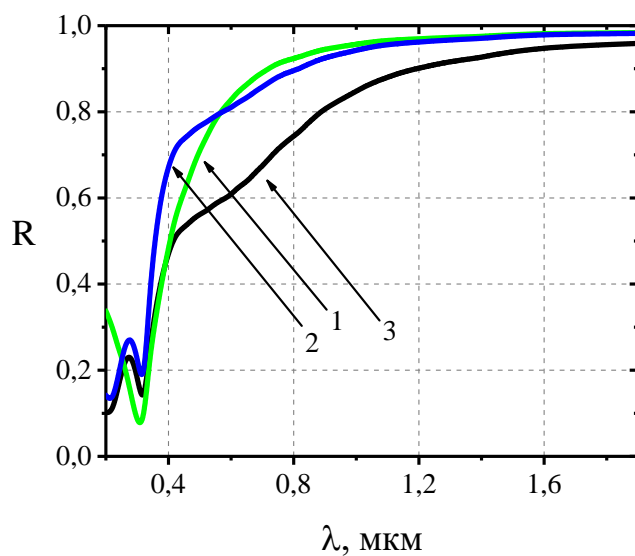
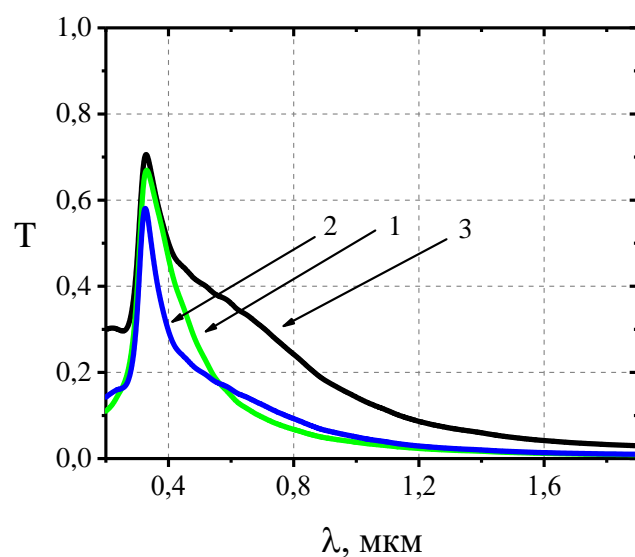


Рис. 5.1. Структурна схема оптичного фільтру

Моделювання проводиться за умови, що кожен шар характеризується товщиною d_i (i – індекс шару), спектральними комплексними електромагнітними параметрами: комплексною діелектричною проникністю ε_i , комплексною магнітною проникністю μ_i (в оптичному діапазоні спектру електромагнітного випромінювання для металевої компоненти $\mu_i = 1$). Необхідно зазначити, що, наприклад, перехідний шар типу Cr/ Al_2O_3 представляє собою нанокompозитну структуру, яка характеризується ефективною комплексною діелектричною проникністю ε_{ef} . Чисельне моделювання виконано при різних значеннях товщини нанорозмірного шару металу d_3 , товщини діелектричних шарів d_1 та співвідношення товщин просвітлюючого d_1 та перехідного d_2 шарів. В даному випадку d_2 була фіксованою і становила 20 нм, товщина d_3 змінювалася в межах від 1 до 15 нм. Результати чисельних розрахунків електромагнітного відгуку металодіелектричної структури представлені на рис. 5.2-5.5.



а)

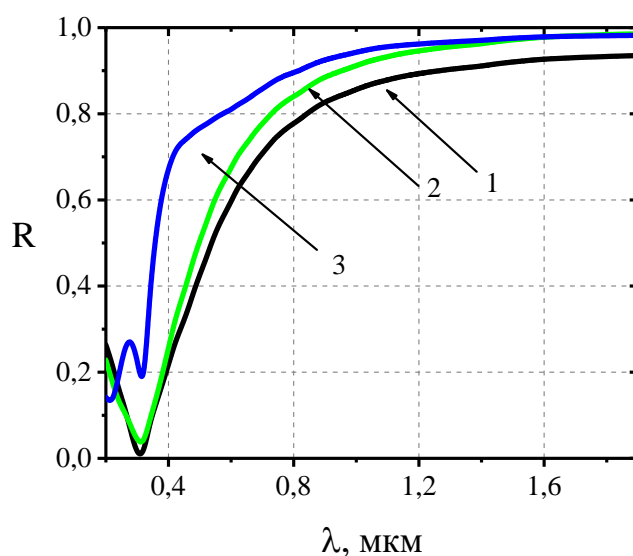


б)

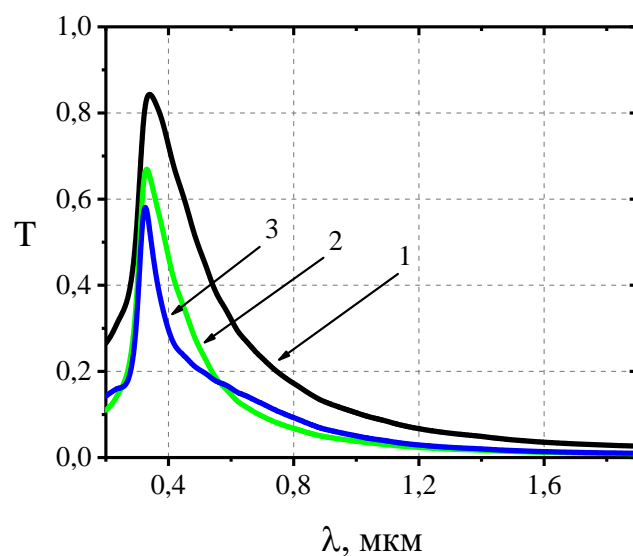
Рис. 5.2. Залежності коефіцієнтів відбивання R (а) та пропускання T (б) від довжини хвилі електромагнітного випромінювання структури $\text{SiO}_2 - \text{Cr/SiO}_2 - \text{Ag} - \text{Cr/SiO}_2 - \text{SiO}_2$ за умови значення структурного параметру $d_3 = 5$ нм та різних значень d_1/d_2 : 1 – 1,67; 2 – 2 ; 3 – 3,3

Як бачимо, з результатів представлених на рис. 5.2., при збільшенні значення співвідношення d_1/d_2 спостерігається відповідно зменшення значень R та

збільшення значень T . Крім того відбувається незначне зміщення критичної довжини хвилі в довгохвильову область.



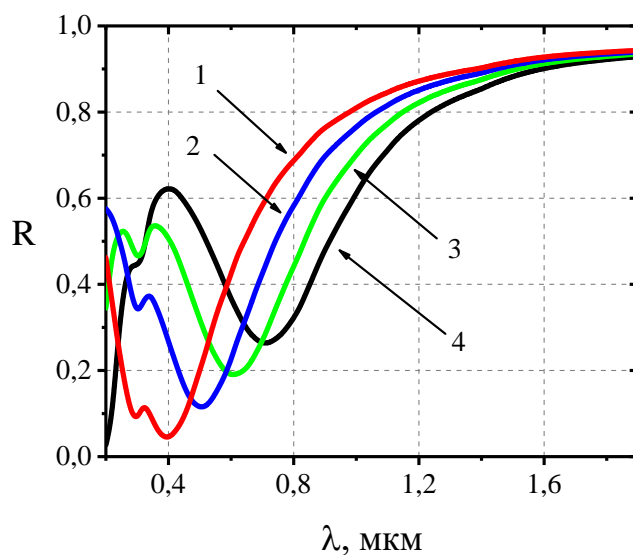
а)



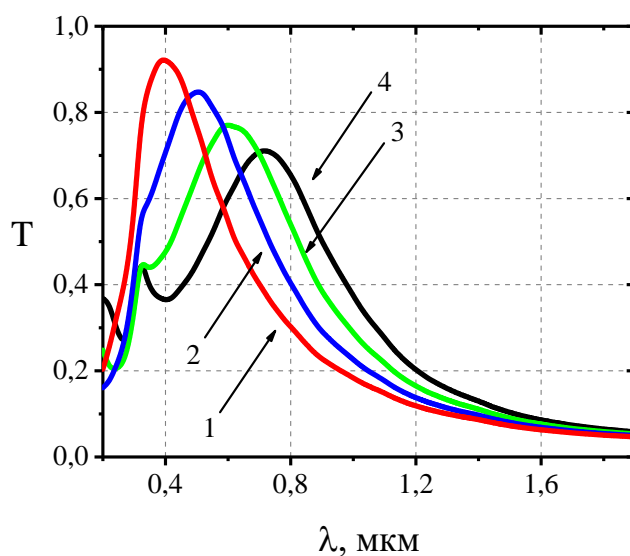
б)

Рис. 5.3. Залежності коефіцієнтів відбивання R (а) та пропускання T (б) від довжини хвилі електромагнітного випромінювання структури $\text{SiO}_2 - \text{Cr/SiO}_2 - \text{Cu} - \text{Cr/SiO}_2 - \text{SiO}_2$ за умови значення структурного параметру $d_1/d_2 = 3,3$ та різних значень d_3 : 1 – 2 нм; 2 – 5 нм ; 3 – 10 нм

Результати представлені на рис. 5.3., як і очікувалося, свідчать про те, що зі збільшенням товщини нанорозмірного шару металу значення параметру R зростає.



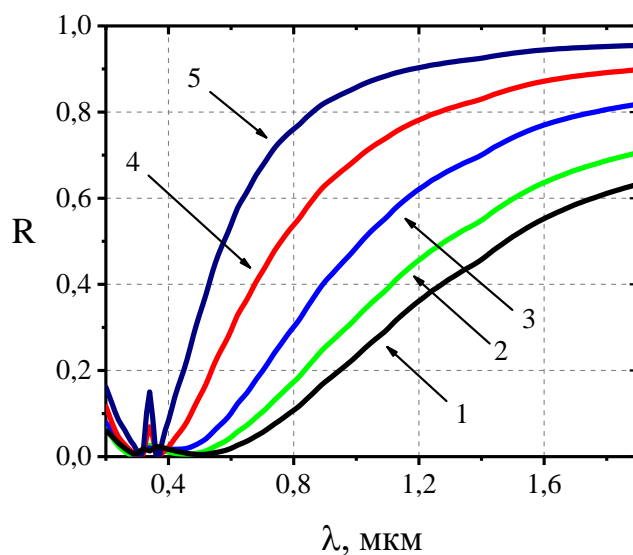
а)



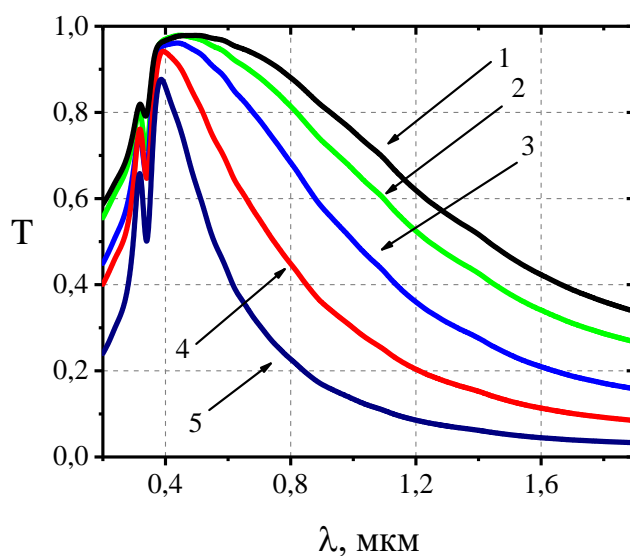
б)

Рис. 5.4. Залежності коефіцієнтів відбивання R (а) та пропускання T (б) від довжини хвилі електромагнітного випромінювання структури $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Ag} - \text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ за умови значення структурного параметру $d_3 = 5$ нм та різних значень d_1/d_2 : 1 – 1; 2 – 1,5; 3 – 2; 4 – 2,5

Результати представлені на рис. 5.4. корелюють з рис. 5.2., однак використання в якості діелектричної компоненти Al_2O_3 дозволяє суттєво регулювати положенням критичної довжини хвилі, зміщуючи її від 0,4 до 0,8 мкм.



а)



б)

Рис. 5.5. Залежності коефіцієнтів відбивання R (а) та пропускання T (б) від довжини хвилі електромагнітного випромінювання структури $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Cu} - \text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ за умови значення структурного параметру $d_1/d_2 = 2$ та різних значень d_3 : 1 – 1 нм; 2 – 2 нм ; 3 – 5 нм; 4 – 8 нм ; 5 – 10 нм

Результати моделювання показують, що зміна товщини нанорозмірного шару срібла та міді від 1 до 15 нм приводить до зрушення положення краю смуги поглинання в більш довгохвильову область. Аналогічна тенденція спостерігається також при збільшенні товщини нанокомпозитного шару або шару діелектрика. Разом з тим з тим можна відзначити, що для селективних структур на основі діелектричних шарів $\varepsilon > 2,5$, від спектральних залежностей $R(\lambda)$, $T(\lambda)$ в ближній інфрачервоній області спектру більше за інших наближається до ідеальної характеристики типового оптичного фільтру з енергозберігаючими властивостями. Проте для таких структур має місце збільшення коефіцієнта відбиття у видимій області.

Для перевірки достовірності та точності результатів моделювання оптичних характеристик нанокомпозитних структур на рис. 5.6 представлені спектральні залежності коефіцієнтів відбивання та пропускання оптичного селективної структури $\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Ag} - \text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$, визначенні експериментально та розраховані за методикою, яка представлена в роботі.

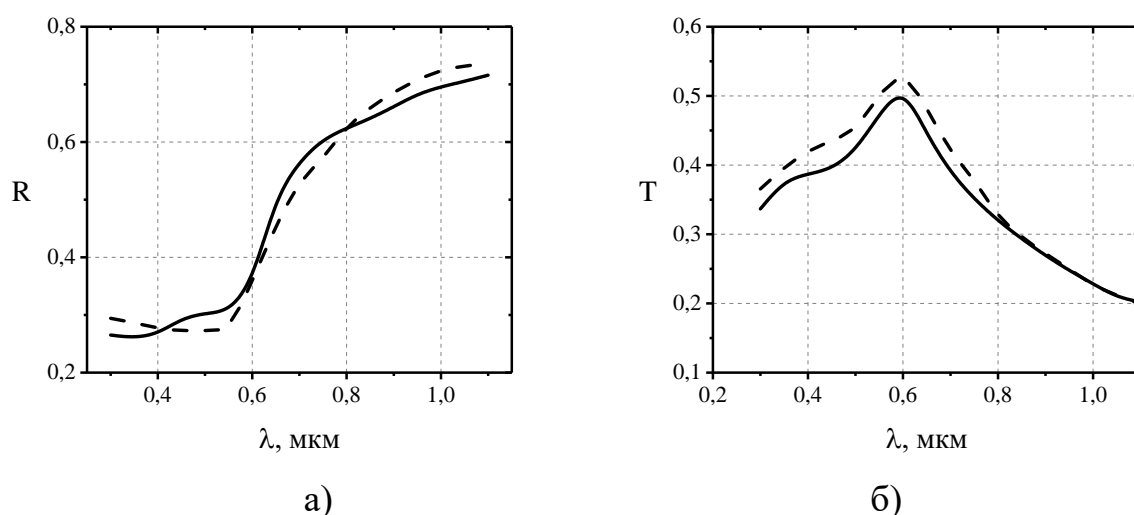


Рис. 5.6. Залежності коефіцієнтів відбивання R (а) та пропускання T (б) від довжини хвилі електромагнітного випромінювання структури $\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Ag} - \text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$: суцільна крива – експериментально визначені значення тестового зразка, штрихова крива – значення розраховані на основі методики, представленої в роботі

Різниця між експериментальними та розрахунковими значеннями не перевищує 5-8 %, що є типовим для похибки розрахунку.

Таким чином, на основі запропонованого підходу можна проводити моделювання спектральних характеристик оптичних параметрів металодіелектричних наноструктурних систем з урахуванням реальних особливостей їх мікроструктури та оптичних характеристик його складових елементів. Це дає можливість:

- істотно підвищити точність прогнозування оптичних характеристик металодіелектричних наноструктурних систем;
- встановити взаємозв'язок між оптичними параметрами металодіелектричних систем та їх структурними параметрами, що дозволяє проводити оптимізацію складних композитних структур та розробляти пристрої з заданими спектрально-селективними характеристиками.

5.2. Основні інтегральні параметри селективних елементів

Оптичні властивості прозорих теплових фільтрів характеризуються як монохроматичними енергетичними, так і інтегральними («візуальними» і «сонячними») коефіцієнтами пропускання (T) і відбивання (R) світла. Візуальні інтегральні T і R відносяться до діапазону спектра $\lambda = 0,38 \div 0,78$ мкм. Сонячні інтегральні T і R вводяться до діапазону $\lambda = 0,3 \div 2,5$ мкм, на який припадає основна частина енергетичного потоку сонячної радіації.

Розглянемо візуальні та сонячні інтегральні коефіцієнти пропускання і відбиття енергоефективних покриттів.

Візуальний інтегральний коефіцієнт пропускання $T_{\text{віз}}$ такого покриття дорівнює відношенню світлового потоку, що пройшов в приміщення через нього з навколишнього середовища, до світлового потоку, що упав на покриття з урахуванням спектрального розподілу P_{λ} випромінювання Сонця та кривої видимості людського ока V_{λ} . Відповідно до роботи [116] величина $T_{\text{віз}}$ визначається співвідношенням:

$$T_{\text{виз}} = \frac{\int_{0,38}^{0,78} T_{\lambda} V_{\lambda} P_{\lambda} d\lambda}{\int_{0,3}^{2,5} V_{\lambda} P_{\lambda} d\lambda}, \quad (5.1)$$

де T_{λ} – монохроматичний коефіцієнт пропускання прозорої перегородки.

Візуальний інтегральний коефіцієнт відбивання $R_{\text{виз}}$ від енергоефективного покриття дорівнює відношенню світлового потоку, відбитого від нього до потоку, що упав на покриття з боку приміщення. Величина $R_{\text{виз}}$ задається співвідношенням, аналогічним (5.1), тільки з заміною T_{λ} на R_{λ} .

$$R_{\text{виз}} = \frac{\int_{0,38}^{0,78} R_{\lambda} V_{\lambda} P_{\lambda} d\lambda}{\int_{0,3}^{2,5} V_{\lambda} P_{\lambda} d\lambda}, \quad (5.2)$$

де R_{λ} – монохроматичний коефіцієнт відбивання прозорої перегородки.

Алгоритм розрахунку візуального інтегрального коефіцієнта відбивання $R_{\text{виз}}$ аналогічний алгоритму розрахунку візуального інтегрального коефіцієнта пропускання $T_{\text{виз}}$, тільки з заміною T_{λ} на R_{λ} .

Сонячний інтегральний коефіцієнт пропускання $T_{\text{сон}}$ енергоефективного покриття в діапазоні сонячного спектра $\lambda = 0,3 \div 2,5$ мкм визначається співвідношенням енергетичного сонячного потоку, що пройшов в приміщення через покриття, до енергетичного сонячного потоку, що впав на нього.

$$T_{\text{сон}} = \frac{\int_{0,3}^{2,5} T_{\lambda} P_{\lambda} d\lambda}{\int_{0,3}^{2,5} P_{\lambda} d\lambda}. \quad (5.3)$$

Сонячний інтегральний коефіцієнт відбивання $R_{\text{сон}}$ енергоефективного покриття являє собою співвідношення, що розглядається в області сонячного спектра $\lambda = 0,3 \div 2,5$ мкм енергетичного сонячного потоку, відбитого покриттям, до енергетичного сонячного потоку, що впав на нього.

$$R_{\text{сон}} = \frac{\int_{0,3}^{2,5} R_{\lambda} P_{\lambda} d\lambda}{\int_{0,3}^{2,5} P_{\lambda} d\lambda} \quad (5.4)$$

На рис. 5.7. представлена блок-схема алгоритму розрахунку сонячного інтегрального коефіцієнта відбивання $R_{\text{сон}}$.

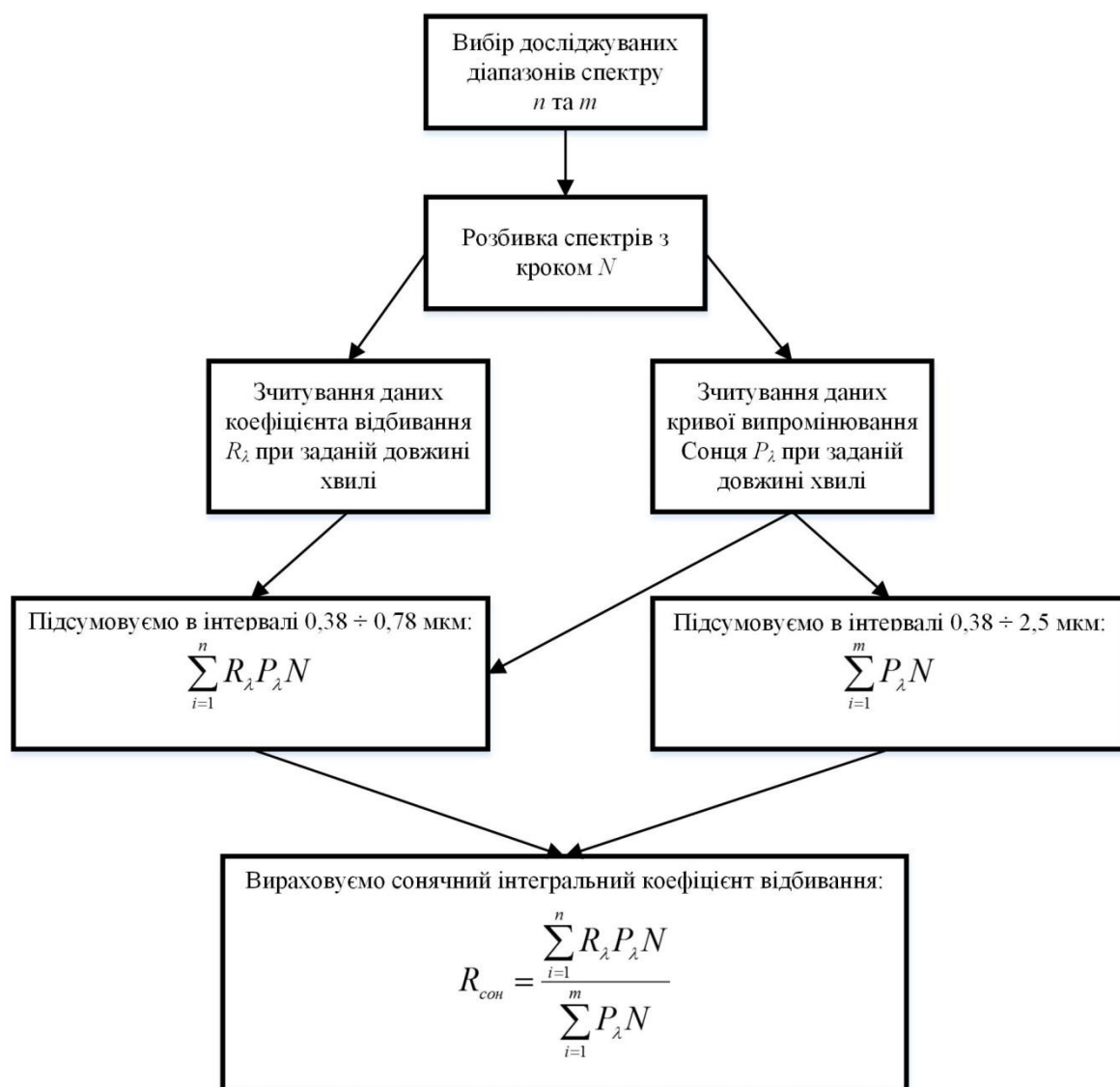


Рис. 5.7. Блок-схема алгоритму розрахунку сонячного інтегрального коефіцієнта відбивання $R_{\text{сон}}$

Інтегральна випромінювальна здатність (ступінь чорноти) енергоефективного покриття характеризує частку його сумарного по спектру

випромінювання від випромінювання абсолютно чорного тіла при тій же температурі та визначається співвідношенням:

$$E = \frac{\int_1^{10} [1 - R_\lambda] W_B(\lambda, T_B) d\lambda}{\int_1^{10} W_B(\lambda, T_B) d\lambda}, \quad (5.5)$$

де $W_B(\lambda, T_B)$ – спектральний розподіл енергії випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі T_B .

На основі результатів отриманих в розділі 5.1, проведено розрахунки значень інтегральних параметрів нанокompatитних структур. Дані, отримані в ході розрахунку, наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Приклади досліджених запропонованих нанокompatитних структур з енергозберігаючими властивостями та їх інтегральні селективні параметри.

Тип структури \ Інтегральний параметр	$R_{\text{Віз}}$	$R_{\text{сон}}$	$T_{\text{Віз}}$	$T_{\text{сон}}$	E
Фільтр з ідеальною спектральною характеристикою	0,0098	0,2647	0,966	0,5766	0,01
$\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Ag} - \text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ 50 нм – 20 нм – 5 нм – 20 нм – 50 нм	0,0229	0,2215	0,7407	0,6503	0,2700
$\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Ag} - \text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ 50 нм – 20 нм – 10 нм – 20 нм – 50 нм	0,1384	0,4643	0,5074	0,3627	0,1005
$\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Cu} - \text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ 50 нм – 20 нм – 5 нм – 20 нм – 50 нм	0,0355	0,2035	0,7322	0,6682	0,2805
$\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Cu} - \text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ 50 нм – 20 нм – 10 нм – 20 нм – 50 нм	0,1522	0,4526	0,5038	0,3768	0,1037
$\text{SiO}_2 - \text{Cr}/\text{SiO}_2 - \text{Ag} - \text{Cr}/\text{SiO}_2 - \text{SiO}_2$ 50 нм – 20 нм – 5 нм – 20 нм – 50 нм	0,0946	0,2146	0,6868	0,6607	0,2928
$\text{SiO}_2 - \text{Cr}/\text{SiO}_2 - \text{Ag} - \text{Cr}/\text{SiO}_2 - \text{SiO}_2$ 50 нм – 20 нм – 10 нм – 20 нм – 50 нм	0,2346	0,4713	0,4543	0,368	0,1085
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Ag} - \text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 50 нм – 20 нм – 5 нм – 20 нм – 50 нм	0,2962	0,2378	0,5308	0,6469	0,3396
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Ag} - \text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 50 нм – 20 нм – 10 нм – 20 нм – 50 нм	0,3451	0,4183	0,3917	0,4207	0,1216
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cu} - \text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 50 нм – 20 нм – 5 нм – 20 нм – 50 нм	0,3705	0,3114	0,468	0,5758	0,3997
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cu} - \text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 50 нм – 20 нм – 10 нм – 20 нм – 50 нм	0,4335	0,578	0,4022	0,2702	0,0638

Проведення розрахунків інтегральних параметрів запропонованих в роботі нанокompозитних структур, що їх можна використовувати в якості оптично прозорих енергозберігаючих покриттів з низькоемісійними або рефлекторними властивостями. Результати досліджень показують, що металодіелектричні структури з нанорозмірним шаром металу (срібло, мідь) товщиною до 5 нм доцільно використовувати в якості селективних низькоемісійних, а при товщині більше 10 нм – в якості рефлекторних.

5.3. Оптимізація оптичних характеристик модельних елементів

Важливим завданням при проектуванні та оптимізації оптично селективних елементів на основі металодіелектричних нанокompозитних структур є встановлення взаємозв'язку між її електромагнітним відгуком і структурними та електромагнітними параметрами системи [117, 118]. Варіюючи вказані параметри можна задавати відповідні селективні характеристики. Вид селективної характеристики визначає ефективність елементу для вирішення відповідних завдань [119].

У випадку оптично селективних елементів з енергозберігаючими властивостями, при прикладному застосуванні важливим є вибір ефективних значень параметрів індивідуального об'єкту. Серед умов, які впливають на вибір цих значень варто виділити наступні: кліматичні умови в яких знаходиться об'єкт; географічне розташуванням об'єкту; орієнтація об'єкту відносно сторін світу. Певному індивідуальному набору таких параметрів відповідає ідеальна спектрально-селективна характеристика.

На основі аналізу оптичних характеристик елементів, наведених в розділі 5.1 запропоновані ідеальні спектрально-селективні характеристики коефіцієнтів відбивання і пропускання та їх цільові функції, приклади яких наведені на рис. 5.8.

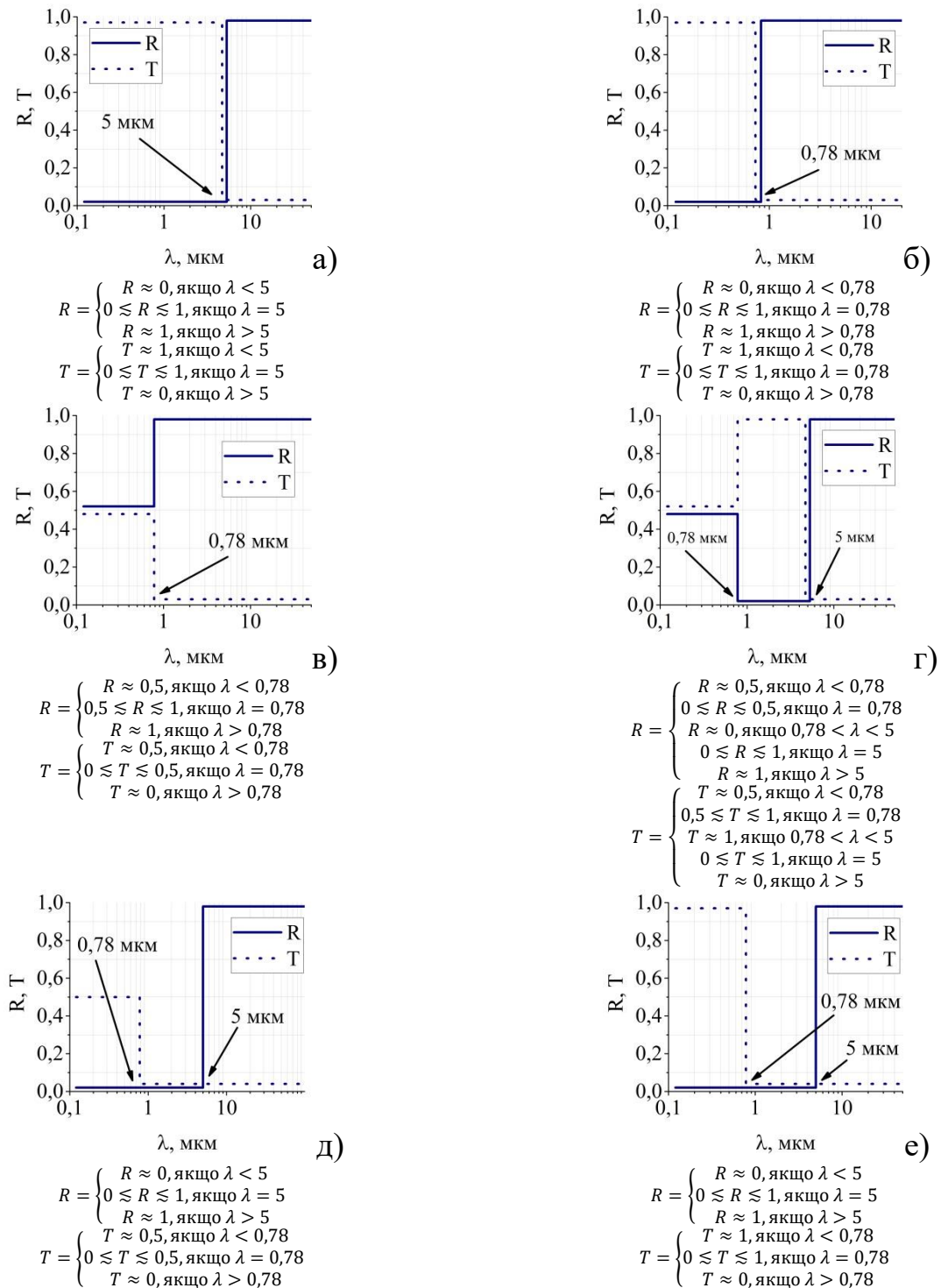


Рис. 5.8. Приклади ідеальних спектральних-селективних характеристик типових оптичних елементів з енергозберігаючими властивостями та їх цільові функції

Як відзначено в розділі 5.1, оптичні характеристики таких елементів залежать від ряду структурних параметрів їх компонент. Змінюючи ці параметри ми можемо керувати їх профілем спектральної селективності. Тому важливе

значення має визначення структурних параметрів, які і будуть визначати оптимальну селективно-спектральну характеристику, найбільш наближену до ідеальної.

Критерієм якості енергоефективних покриттів є оціночна функція f , яка обчислюється по видимому діапазоні спектра як сума квадратів різниць за даною і розрахунковою величинами пропускання та/або відбивання:

$$f = \sum_{i=1}^M \left(1 - (T_0(\lambda_i) - T(\lambda_i))^2 - (R_0(\lambda_i) - R(\lambda_i))^2 \right),$$

де $T_0(\lambda_i)$, $R_0(\lambda_i)$ – задані величини коефіцієнтів пропускання та відбивання, $T(\lambda_i)$, $R(\lambda_i)$ – розрахункові величини коефіцієнтів пропускання та відбивання; M – число точок розрахунку.

Для реалізації цього завдання обираємо еволюційний метод оптимізації [120], який часто використовують для вирішення подібних завдань. Серед основних переваг даного методу варто виділити наступні:

- широка область застосування;
- низька ціна розробки і застосування;
- простота об'єднання з іншими методами;
- обробка великої кількості альтернативних рішень.

В свою чергу, серед основних недоліків виділяють:

- відсутність гарантії знаходження оптимального рішення за кінцевий час;
- часто в обчислювальному відношенні дорогий метод, тобто повільний.

На рис. 5.9 представлена блок-схема алгоритму еволюційного методу оптимізації.

Оптимізацію проводять для структури (індивіда), яка складається зі заданої кількості складових, кожна з яких характеризується параметром d . Значення, які може набувати d лежать в межах від d_n до d_v .

На початку, за допомогою генератора випадкових величин, який присвоює кожній складовій випадкове значення d формується початкова множина, яка складається з N індивідів. Наступним кроком є визначення середньої оціночної функції $\delta = \sum_{i=1}^N \delta_i / N$, де δ_i – оціночна функція i -го індивіда.

Після цього за допомогою оператора відбору з цієї множини вибираються два індивіди, у яких значення оціночної функції менше, ніж середнє по множині. В свою чергу, оператор зміни, знову ж таки за допомогою генератора випадкових величин, покроково змінює параметр d для цих двох індивідів. В результаті формується нова множина, а також визначається нова середня оціночна функція. У випадку, якщо нова δ менша за попередню, на основі отриманих результатів цикл починається заново. За умови, що нова δ більша за попередню, отримані результати не беруться до уваги.

Процес триває задану кількість ітерацій p . Таким чином, середня оціночна функція, зменшуючи своє значення від ітерації до ітерації, задає напрямок зміни параметра d . В результаті, по закінченню встановленої кількості ітерацій залишається множина індивідів з параметрами d , значення яких близьке до ідеального.

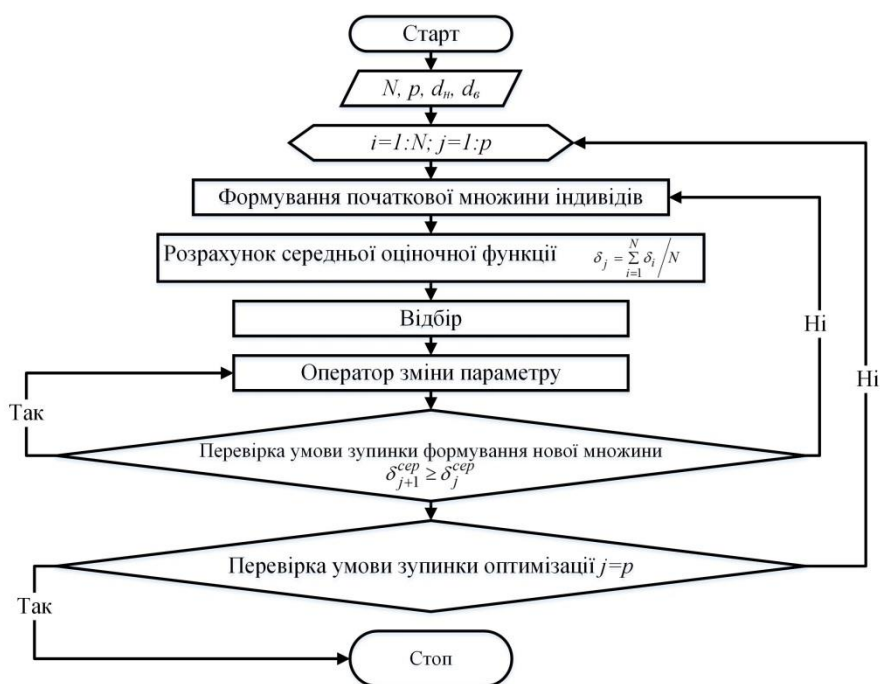


Рис. 5.9. Блок-схема алгоритму еволюційного методу оптимізації

На рис. 5.10 представленні результати оптимізації оптичних характеристик селективного елемента типу інфрачервоний відсікаючий фільтр. Цільовою функцією оптимізації обрано ідеальну селективну характеристику відсікаючих фільтрів для застосування в теплих кліматичних умовах (рис. 5.8, б) Крива 1 відповідає металодіелектричній системі, з товщиною нанорозмірної металевої плівки срібла $d_3 = 10$ нм, крива 2 – $d_3 = 20$ нм.

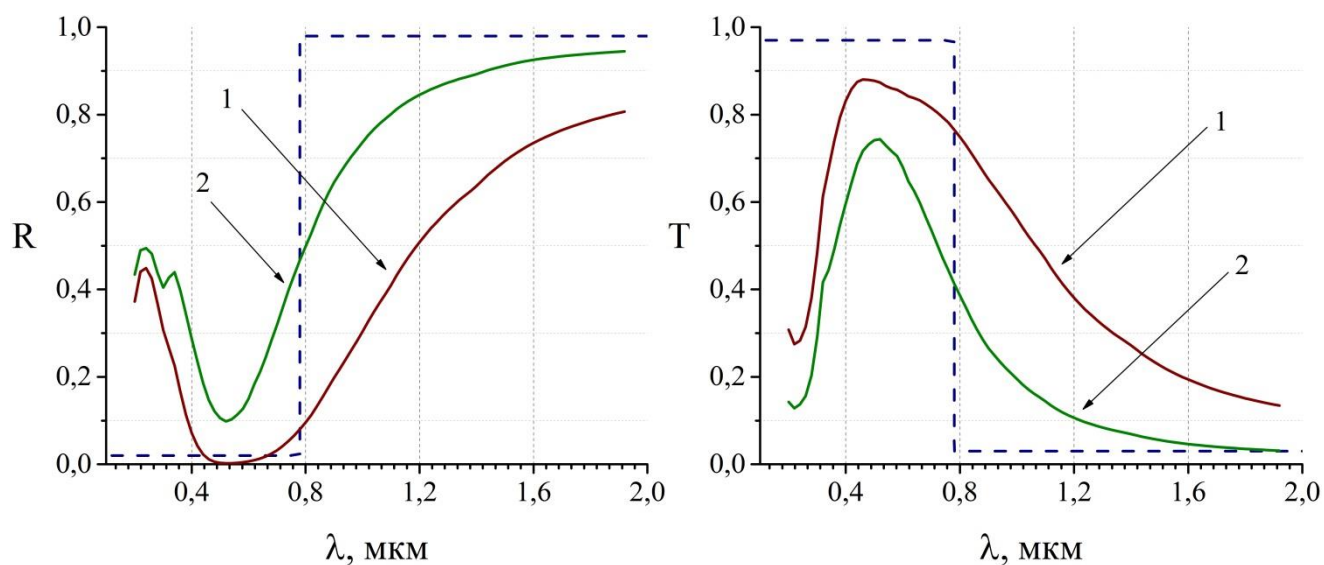


Рис. 5.10. Спектральні залежності коефіцієнтів відбивання R та пропускання T : 1 – модельна структура з $d_3 = 10$ нм; 2 – модельна структура з $d_3 = 20$ нм; штрихова лінія – ідеальна селективна характеристика відсікаючого фільтру

Як видно з рис.5 10, в досліджуваному спектральному діапазоні від 0,2 до 2 мкм різниця між цільовою функцією (1) та кривими 1, 2 становить близько 25%, 15% відповідно. Бачимо, що отримані селективні характеристики забезпечують високу ступінь прозорості в видимому діапазоні $0,38 \div 0,78$ мкм. Тому даний методу є ефективним інструментом у вирішенні задачі оптимізації мікроструктурних та електромагнітних параметрів енергоефективних відсікаючих фільтрів на основі нанокмполитних металодіелектричних структур.

Оптимізація енергоефективних покриттів наглядно демонструється залежностями інтегральних коефіцієнтів від їх структурних параметрів. Так можна більш точно простежити хід зміни і знайти значення, при яких шукані

параметри будуть мінімальними або максимальними. Графіки таких кривих показані на рис. 5.11-5.14.

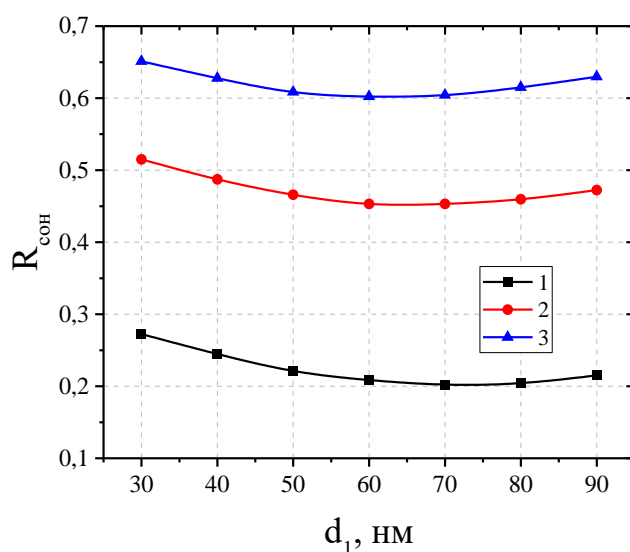


Рис. 5.11. Залежність сонячного коефіцієнта відбивання від товщини шару діелектрика d_1 при різних товщинах d_3 плівки срібла в структурі

$\text{SiO}_2 - \text{Cr/SiO}_2 - \text{Ag} - \text{Cr/SiO}_2 - \text{SiO}_2$:

1 – 2 нм, 2 – 5 нм, 3 – 10 нм

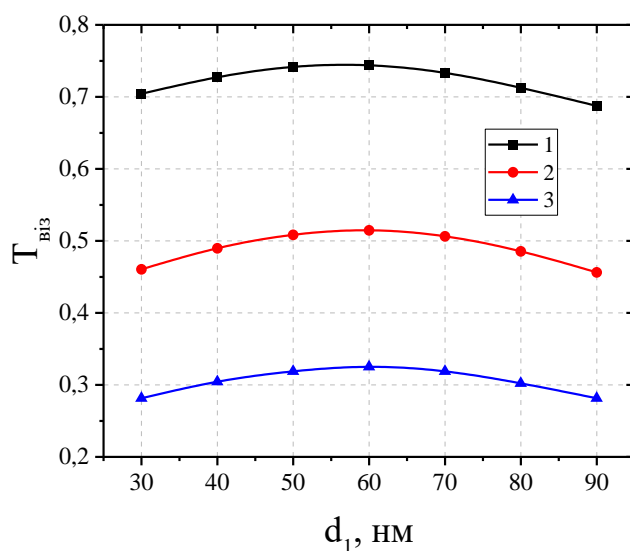


Рис. 5.12. Залежність візуального коефіцієнта пропускання від товщини шару діелектрика d_1 при різних товщинах d_3 плівки срібла в структурі

$\text{SiO}_2 - \text{Cr/SiO}_2 - \text{Ag} - \text{Cr/SiO}_2 - \text{SiO}_2$:

1 – 2 нм, 2 – 5 нм, 3 – 10 нм

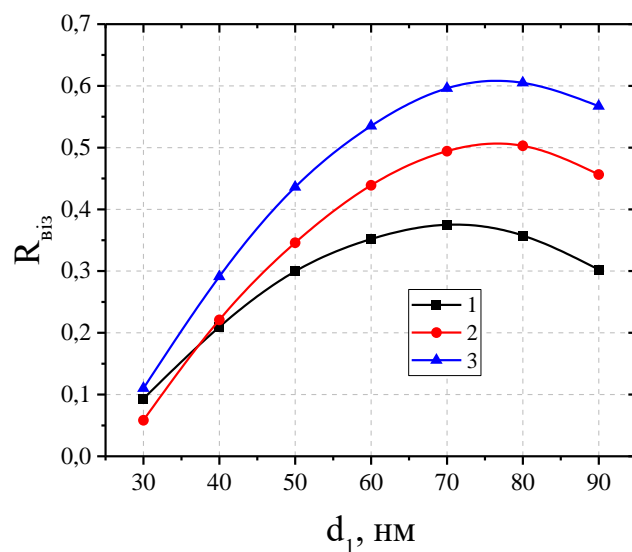


Рис. 5.13. Залежність візуального коефіцієнта відбивання від товщини шару діелектрика d_1 при різних товщинах d_3 плівки міді в структурі $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cu} - \text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$:
1 – 2 нм, 2 – 5 нм, 3 – 10 нм

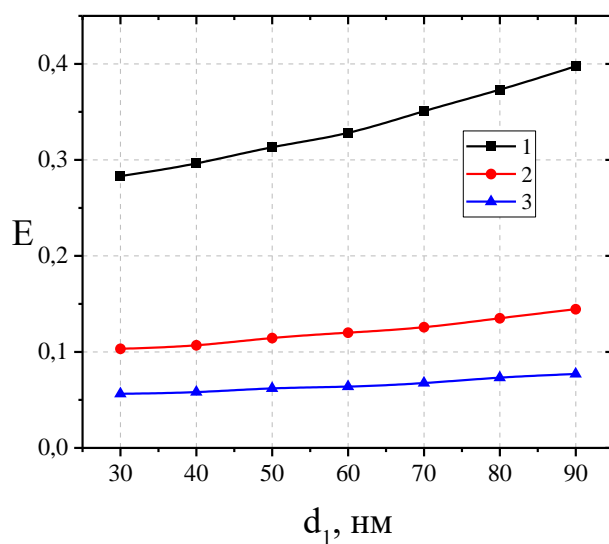


Рис. 5.14. Залежність випромінювальної здатності (ступеня чорноти) від товщини шару діелектрика d_1 при різних товщинах d_3 плівки міді в структурі $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cu} - \text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$:
1 – 2 нм, 2 – 5 нм, 3 – 10 нм

5.4. Перспективи застосування сформованих оптично селективних елементів та порівняння з існуючими аналогами

Проведемо аналіз особливостей та перспектив прикладного застосування нанокомпозитних металодіелектричних структур в сферах, яким останнім часом приділяється значна увага. А саме: інформаційні системи передачі, зберігання та захисту інформації [121-125]; захисні екрануючі та радіопоглинаючі покриття (сформовані на основі мікроелектронної технології) [126-134]; енергетично ефективні пристрої в оптичному діапазоні спектру для використання в енергозберігаючих технологіях та просвітлюючі структури для фотоелектричних перетворювачів [135-137].

Суттєве місце у вирішенні проблеми ефективності використання енергетичних ресурсів за рахунок застосування відновлюваних джерел енергії, зокрема, сонячного випромінювання, та широкого впровадження в промисловий і побутовий комплекси енергозберігаючих технологій займає розробка і використання енергетично ефективних пристроїв, що представляють собою оптично селективні структури, або теплові фільтри [116, 138].

Для перевірки конкурентоспроможності запропонованих нанокомпозитних металодіелектричних структур в якості теплових фільтрів в таблиці 5.2 наведено інтегральні параметри представлених на ринку енергоефективних покриттів та модельної структури, розрахованої за представленими в роботі методиками.

Таблиця 5.2

Інтегральні параметри запропонованого в роботі енергоефективного покриття та відомих світових аналогів.

Фірма, тип	$T_{сон}$	$R_{сон}$	$T_{віз}$	$R_{віз}$	E
НИЦ ППЭ, ІТО	0,53	0,11	0,66	0,15	0,25
НИЦ ППЭ, Ag шарувата НК 18	0,43	0,34	0,69	0,13	0,15
Marcon Coatings, E1-85-3.mar	0,52	0,26	0,78	0,13	0,39
Cardinal IG, EE72-9.CIG	0,355	0,36	0,71	0,12	–
Силікатне скло	0,7	0,13	0,81	0,15	0,84
Приклад оптично селективного елементу на основі нанокомпозитної структури $Cr/Cr_2O_3-Ag-Cr/Cr_2O_3$	0,51	0,22	0,68	0,135	0,09

З аналізу даних представлених в табл. 5.2 видно, що параметри запропонованого покриття знаходяться на рівні світових аналогів, а враховуючи те, що представлений в роботі підхід виготовлення таких покриттів є економічно вигіднішим за рахунок зменшення числа технологічних операцій, певною мірою перевершують їх.

Висновки до розділу 5

Визначено спектральні характеристики коефіцієнтів відбивання та пропускання елементів на основі рефлекторного шару срібла або міді та досліджених нанокompозитів. Досліджено залежності коефіцієнтів пропускання та відбивання селективних елементів від структурних параметрів композитних шарів на основі нанорозмірних включень хрому. Показано спектральне зміщення значень критичної довжини хвилі електромагнітного випромінювання на 0,4 мкм при зміні структурних параметрів нанорозмірних компонент, що дозволяє керувати профілем спектральної залежності оптично селективних елементів.

Запропоновано оптично селективні елементи, прозорі у видимому діапазоні спектру, які відрізняються від відомих аналогів тим, що замість багатошарових діелектричних структур, використано металодіелектричний композит.

Наведено основні інтегральні параметри запропонованих оптично селективних елементів. Надано рекомендації щодо їх використання в якості енергоефективних елементів.

Запропоновано критерії ефективності оптичних елементів на основі нанокompозитних структур з енергозберігаючими властивостями, що дозволяє проводити оптимізацію їх спектральних характеристик на забезпечення максимальної ефективності з точки зору енергозбереження.

Вказано перспективи застосування сформованих оптично селективних елементів та проведено їх порівняння з існуючими аналогами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача розробки оптично селективних елементів з заданими спектральними характеристиками на основі нанокompозитних структур.

Основні результати та висновки роботи полягають в наступному:

1. Досліджено нанорозмірні шари срібла на підкладках SiO_2 , виготовлені методом вакуумного осадження. Встановлено особливості їх спектральних залежностей коефіцієнтів пропускання та відбивання в інтервалі $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм. Визначено значення оптичних параметрів нанорозмірних шарів металів на основі результатів спектрофотометричних досліджень експериментальних зразків. Встановлено апроксимаційні співвідношення дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності нанорозмірних плівок срібла з товщинами від 1 до 35 нм в спектральному діапазоні довжин хвиль $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм, які застосовано в якості вхідних даних рефлекторних шарів срібла при моделюванні оптично селективних елементів.

2. Запропоновано обчислювальні алгоритми на основі матричного методу послідовного нарощування шарів, які використано для визначення оптичних параметрів нанорозмірних шарів та розробки оптично селективних елементів.

3. Визначено значення ефективної комплексної діелектричної проникності нанокompозитних шарів з діелектричною компонентою (Al_2O_3 , SiO_2 , Cr_2O_3) та металевою нанорозмірною фазою хрому в спектральному діапазоні $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм з врахуванням оптичних параметрів їх компонент. Встановлено особливості спектральної зміни дійсної та уявної частини комплексної ефективної діелектричної проникності досліджуваних нанокompозитів зі значеннями фактору заповнення металевої фази хрому від 0,15 до 0,54, що враховано при розробці оптично селективних елементів.

4. Встановлено апроксимаційні залежності комплексної ефективної діелектричної проникності нанорозмірних композитних шарів $\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$, Cr/SiO_2 , $\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ в спектральному діапазоні $\lambda = 0,3 \div 2$ мкм, які використано для

моделювання та дослідження впливу композитних нанорозмірних шарів на спектральні характеристики оптично селективних елементів. Запропоновані співвідношення можуть бути застосовані для проектування оптично селективних елементів, прозорих у видимому діапазоні спектру на основі досліджуваних матеріалів.

5. Визначено спектральні характеристики коефіцієнтів відбивання та пропускання елементів на основі рефлекторного шару срібла або міді та досліджених нанокompозитів. Досліджено залежності коефіцієнтів пропускання та відбивання селективних елементів від структурних параметрів композитних шарів на основі нанорозмірних включень хрому. Показано спектральне зміщення значень критичної довжини хвилі електромагнітного випромінювання на 0,4 мкм при зміні структурних параметрів нанорозмірних компонент, що дозволяє керувати профілем спектральної залежності оптично селективних елементів.

6. Запропоновано оптично селективні елементи, прозорі у видимому діапазоні спектру, які відрізняються від відомих аналогів тим, що замість багатошарових діелектричних структур, використано металодіелектричний композит. Встановлено критерії оптимізації оптичних спектральних характеристик для забезпечення заданої оптичної селективності в різних експлуатаційних умовах. Показано, що запропоновані елементи, зокрема, на основі структур $\text{Cr/Cr}_2\text{O}_3 - \text{Ag} - \text{Cr/Cr}_2\text{O}_3$ досягають значень інтегральних параметрів $T_{\text{сoн}} = 0,51$, $R_{\text{сoн}} = 0,22$, $T_{\text{віз}} = 0,68$, $R_{\text{віз}} = 0,135$, $E = 0,09$, а структур $\text{Cr/Al}_2\text{O}_3 - \text{Ag} - \text{Cr/Al}_2\text{O}_3$ відповідно значень $T_{\text{сoн}} = 0,53$, $R_{\text{сoн}} = 0,21$, $T_{\text{віз}} = 0,67$, $R_{\text{віз}} = 0,12$, $E = 0,1$. Такі селективні структури рекомендуються для використання в якості теплових фільтрів в енергозберігаючих технологіях.

Результати дисертаційних досліджень можуть бути застосовані для продовження досліджень та подальшої розробки оптично селективних елементів на основі нанокompозитних структур у вказаному напрямку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wilder, J. G. "Porous silica AR coating for use at 248 nm or 266 nm." *Applied optics* 23.10 (1984): 1448-1449.
2. Thomas, Ian M. "Method for the preparation of porous silica antireflection coatings varying in refractive index from 1.22 to 1.44." *Applied optics* 31.28 (1992): 6145-6149.
3. O'Neill, F., et al. "Colloidal silica coatings for KrF and Nd: glass laser applications." *Applied optics* 26.5 (1987): 828-832.
4. Thomas, Ian M. "Porous fluoride antireflective coatings." *Applied optics* 27.16 (1988): 3356-3358.
5. Dobrowolski, J. A. "Optical properties of films and coatings." *Handbook of Optics I*. New York: McGraw-Hill, 1995. 42.3-42.130.
6. Motamedi, M. E., W. H. Southwell, and W. J. Gunning. "Antireflection surfaces in silicon using binary optics technology." *Milestone Series MS 166*. SPIE, 2001. 225-230.
7. Hass, G., H. H. Schroeder, and A. F. Turner. "Mirror coatings for low visible and high infrared reflectance." *JOSA* 46.1 (1956): 31-35.
8. Dobrowolski, J. A., B. T. Sullivan, and R. C. Bajcar. "Optical interference, contrast-enhanced electroluminescent device." *Applied optics* 31.28 (1992): 5988-5996.
9. Dobrowolski, J. A., et al. "High performance optical wavelength multiplexer-demultiplexer." *Applied optics* 31.19 (1992): 3800-3806.
10. Scott, M. L., et al. "Extreme ultraviolet reflectance degradation of aluminum and silicon from surface oxidation." *Applied optics* 27.8 (1988): 1503-1507.
11. Malina, R. F., and W. Cash. "Extreme ultraviolet reflection efficiencies of diamond-turned aluminum, polished nickel, and evaporated gold surfaces." *Applied optics* 17.20 (1978): 3309-3313.
12. Windt, D. L., et al. "Optical constants for thin films of C, diamond, Al, Si, and CVD SiC from 24 Å to 1216 Å." *Applied optics* 27.2 (1988): 279-295.

13. Temple, P. A. "Thin-film absorptance measurements using laser calorimetry." *Handbook of optical constants of Solids*. Academic Press, 1997. 135-153.
14. Anderson, Dana Z., Josef C. Frisch, and Carl S. Masser. "Mirror reflectometer based on optical cavity decay time." *Applied optics* 23.8 (1984): 1238-1245.
15. Amra, Claude, Pierre Roche, and Emile Pelletier. "Interface roughness cross-correlation laws deduced from scattering diagram measurements on optical multilayers: effect of the material grain size." *JOSA B* 4.7 (1987): 1087-1093.
16. Bennett, Jean M. *Surface roughness and scattering*. Proceedings of The Manufacturing & Machine Tool Conference, November 2004.
17. Bennett, Jean M. "Recent developments in surface roughness characterization." *Measurement Science and Technology* 3.12 (1992): 1119-1127.
18. Hass, G., and W. R. Hunter. "Laboratory experiments to study surface contamination and degradation of optical coatings and materials in simulated space environments." *Applied Optics* 9.9 (1970): 2101-2110.
19. Hunter, W. R. "Optical contamination: its prevention in the XUV spectrographs flown by the US Naval Research Laboratory in the Apollo Telescope Mount." *Applied optics* 16.4 (1977): 909-916.
20. Ward, Leslie. *The optical constants of bulk materials and films*. Bristol: Adam Hilger, 1988, 244 p.
21. Savinov, M., et al. *Modeling of metal-dielectric nanocomposite coatings with ferromagnetic inclusions for ensuring electromagnetic protection of electronic devices*, Proceedings of the IEEE 34th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 16-19 April 2014.
22. Секер, В. П., и Б. Б. Бабыч. *Спектры поглощения и отражения нанокompозитных структур на основе серебра*, Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених "ЕЛЕКТРОНІКА-2017" (ELCONF), Київ, 25-27 квітня 2017 р.
23. Rodionova, M.V., et al. "Basics of application nanostructured materials for electromagnetic compatibility of electronic devices." *Electronics and Communications* 3 (2010): 9-15.

24. Якименко, Ю. И., и др. *СВЧ-характеристики металлодиэлектрических нанокompозитных материалов*, Материалы 20-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, 13-17 сентября 2010 г.
25. Uteza, Olivier, et al. "Laser-induced damage threshold of sapphire in nanosecond, picosecond and femtosecond regimes." *Applied Surface Science* 254.4 (2007): 799-803.
26. Мачулянский, А. В., и В. А. Попов. "Терморегулирующие покрытия в устройствах силовой электроники." *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електроніки"* 5 (2006): 87-88.
27. Musset, A., and A. Thelen. "IV Multilayer Antireflection Coatings." *Progress in Optics*. Vol. 8. Elsevier, 1970. 201-237.
28. Borisova, A., et al. *Energy-efficient optically transparent coating based on a metal-dielectric composites*, Proceedings of the IEEE 35th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 21-24 April 2015.
29. Tsui, Kwong-Hoi, et al. "Low-cost, flexible, and self-cleaning 3D nanocone anti-reflection films for high-efficiency photovoltaics." *Advanced Materials* 26.18 (2014): 2805-2811.
30. Tang, Lei, et al. "Large-scale, adhesive-free and omnidirectional 3D nanocone anti-reflection films for high performance photovoltaics." *Journal of Semiconductors* 40.4 (2019): 042601.
31. Furman, Sh. A., and A. V. Tikhonravov. *Basics of optics of multilayer systems*. Paris, ADAGP, 1992. 242 p.
32. Первак, Ю. О. *Оптика багатошарових покриттів*. Київ: ВПЦ "Київський університет.", 2005. 247 с.
33. Бомейстер, Ф., и Дж Пинкус. "Оптические интерференционные покрытия." *Успехи физических наук* 110.6 (1973): 293-307.
34. Бернинг, П. Х. "Теория и методы расчета оптических свойств тонких пленок." *Физика тонких пленок. Том 1*. Москва: Мир, 1967. 91-151.

35. Телен, А. "Конструирование многослойных интерференционных светофильтров." *Физика тонких пленок. Том 5*. Москва: Мир, 1972. 46-83.
36. Кард, П. Г. *Анализ и синтез многослойных интерференционных пленок*. Таллин: Валгус, 1971. 235 с.
37. Kempa, M., et al. "Composition dependent microwave properties of dielectric-conductor nanocomposites." *Phase Transitions* 91.9-10 (2018): 1027-1035.
38. Skaar, J., L. Wang, and T. Erdogan. "Synthesis of thick optical thin-film filters with a layer-peeling inverse-scattering algorithm." *Applied optics* 40.13 (2001): 2183-2189.
39. Li, L., and J. A. Dobrowolski. "Computation speeds of different optical thin-film synthesis methods." *Applied optics* 31.19 (1992): 3790-3799.
40. Maitland, A., and M. Dunn. *Laser Physics*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1969. 312 p.
41. Maciá, Enrique. "Exploiting quasiperiodic order in the design of optical devices." *Physical Review B* 63.20 (2001): 205421.
42. Gellermann, W., et al. "Localization of light waves in Fibonacci dielectric multilayers." *Physical review letters* 72.5 (1994): 633-636.
43. Carretero, L., et al. "Matrix method for the study of wave propagation in one-dimensional general media." *Optics express* 14.23 (2006): 11385-11391.
44. Dobrowolski, J. A., and B. T. Sullivan. "Universal antireflection coatings for substrates for the visible spectral region." *Applied optics* 35.25 (1996): 4993-4997.
45. Lee, J. H., and Y. J. Lee. "Starting-Design-Independent Solutions in the Optimization of Antireflection Coatings." *Journal of Korean Physical Society* 37 (2000): 579-586.
46. Vossen, John L., and Werner Kern. *Thin film processes II*. Academic Press, 2012. 888 p.
47. Jacobson, Michael Ray. *Selected papers on deposition of optical coatings*. SPIE, 1992. 712 p.

48. Bennett, Jean M., et al. "Comparison of the properties of titanium dioxide films prepared by various techniques." *Applied optics* 28.16 (1989): 3303-3317.
49. Rodionov, M., et al. "Aluminum oxynitride dielectric films prepared by reactive sputtering." *Electronics and Communications* 20.3(86) (2015): 31-36.
50. Waldorf, Allan J., et al. "Optical coatings deposited by reactive ion plating." *Applied optics* 32.28 (1993): 5583-5593.
51. Depla, D., S. Mahieu, and J. E. Greene. "Sputter deposition processes." *Handbook of deposition technologies for films and coatings*. William Andrew Publishing, 2010. 253-296.
52. Verbitskiy, V., et al. *Dimensional dependencies of optical parameters of nanodimensional metal particles*, Proceedings of the IEEE 36th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 19-21 April 2016.
53. Lee, C. Y., et al. "Matrix formalism of electromagnetic wave propagation through multiple layers in the near-field region: Application to the flat panel display." *Physical Review E* 67.4 (2003): 046605.
54. Baghdasaryan, H. V., and T. M. Knyazyan. *Extension of the Method of Single Expression for Analysis of Materials with Complex Permittivity and Permeability*, 2006 International Conference on Transparent Optical Networks, Nottingham, IEEE, 2006.
55. Litvinenko, L. N., S. A. Pogarsky, and S. I. Prosvirnin. "Wave diffraction by semi-infinite periodical structures." *International journal of infrared and millimeter waves* 17.5 (1996): 897-903.
56. Багдасарян, О. В., Т. М. Князян, и Г. Г. Эйрамджян. "Электродинамическая модель металл-диэлектрической многослойной структуры, прозрачной в видимом диапазоне волн." *Изв. НАН РА и ГИУА* 61.1 (2008): 101-108.

57. Литвиненко, Д. Л., Л. Н. Литвиненко, и С. Л. Просвирнин. "Метод анализа дифракции волн на многослойных периодических структурах." *Радиофизика и радиоастрономия* 2.4 (1997): 485-491.
58. Серафин, Б., ред. *Преобразование солнечной энергии. Вопросы физики твердого тела*. Пер. с англ. М. М. Колтуна, В. М. Евдокимова. Москва: Энергоатомиздат, 1982. 319 с.
59. Bondar, V., et al. *Conductivity of metal (Al, Cu)-dielectric composites and modeling of the single- and multi-layer composite coatings for microwave applications*, Proceedings of the IEEE 34th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 16-19 April 2014.
60. Золотарев, В. М., Н. В. Никоноров, и А. И. Игнатъев. *Современные методы исследования оптических материалов. Часть I*. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. 266 с.
61. Machulianskyi, O. V. "Specific electric polarizability of copper nanoparticles in the optical range of the spectrum." *Microsystems, Electronics and Acoustics* 23.2 (2018): 1-9.
62. Золотарев, В. М., Н. В. Никоноров, и А. И. Игнатъев. *Современные методы исследования оптических материалов. Часть I*. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. 266 с.
63. Абелес, Ф. *Физика тонких пленок: Оптические свойства металлических пленок*. Т. 6. Москва: Мир, 1973. С. 171-227.
64. Бондарь, Е. А., и А. В. Мачулянский. "Спектрофотометрический метод определения динамической поляризуемости ультрадисперсных металлических частиц. Алгоритм вычислений." *Оптика и спектроскопия* 70.1 (1991): 161-163.
65. Хлебцов, Н. Г. "Приближенный метод вычисления рассеяния и поглощения света фрактальными кластерами." *Оптика и спектроскопия* 88.4 (2000): 594-601.
66. Мачулянский, А. В., Д. Д. Татарчук, и В. А. Мачулянский. "Анализ СВЧ-свойств нанодисперсных композитных систем." *Технічна*

- електродинаміка. Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність" 1 (2010): 303-304.
67. Болтс, Гейнрих, и др. *Обратные задачи в оптике*. Москва: Машиностроение, 1984. 200 с.
 68. Тарасовська, Н. П., та ін. "Моделювання наноструктурних металодіелектричних систем для використання в якості оптичних фільтрів." *Вісник Херсонського національного технічного університету* 1.3(58) (2016): 371-375.
 69. Бондарь, Е. А., Ю. А. Кулюпин, и Н. М. Попович "К оптическим свойствам островковых металлических пленок. Модель изотропной однородной плоскопараллельной пластинки." *Оптика и спектроскопия* 49.4 (1980): 791-796.
 70. Виноградов, А. П. *Электродинамика композитных материалов*. Москва: Наука, 2001. 208 с.
 71. Telichkina, O.V., et al. *UHF characteristics of metal-dielectric nanocomposite materials*. Proceedings of the IEEE 20th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology", Sevastopol, 13-17 September 2010.
 72. Milton, G. W. "Bounds on the complex permittivity of a two-component composite material." *Journal of Applied Physics* 52.8 (1981): 5286-5293.
 73. Bruggeman, D. A. G. "Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen." *Annalen der Physik* 416.7 (1935): 636-664.
 74. Koroliouk, D., et al. *Applications of metal-dielectric nanocomposite structures in information systems*, Proceedings of the IEEE 38th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 24-26 April 2018.
 75. Machulianskyi, O. V., B. B. Babych, and V. O. Machulianskyi. "Modeling of an electromagnetic response of single-layer nanocomposite coatings." *Visnyk of Kherson National Technical University* 1.3(66) (2018): 104-108.

76. Wolter, Hans. "Zur optik dünner metallfilme." *Zeitschrift für Physik* 105.5-6 (1937): 269-308.
77. Кондрашов, В. Е., и А. С. Шефов. "Метод определения оптических постоянных и толщины полупроводниковых слоев." *Известия АН СССР. Серия физическая* 28.9 (1964): 1444-1446.
78. Harris, Louis, and Arthur L. Loeb. "Evaluation and analysis of optical and electrical constants of thin films as functions of reflectance and transmission data by electronic digital computation." *JOSA* 45.3 (1955): 179-188.
79. Hunderi, Ola. "Influence of grain boundaries and lattice defects on the optical properties of some metals." *Physical Review B* 7.8 (1973): 3419-3429.
80. Machulianskyi, O. V., B. B. Babych, and V. O. Machulianskyi. *Modeling of an electromagnetic response of single-layer nanocomposite coatings*, Materials of 19th international conference of mathematical modelling is dedicated to 250 anniversary from the birthday Jean-Baptiste Joseph Fourier, Kherson, 17-21 September 2018.
81. Machulansky, A., and B. Babych. "Selective energy-saving metal-dielectric nanocomposite coatings based on copper." *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка* 1/2.21/22 (2014): 74-78.
82. Тихонов, А. Н., и В. Я. Арсенин. *Методы решения некорректных задач*. Москва: Наука, 1974. 224 с.
83. Мачулянский, А. В., и др. "Металлодиэлектрические нанокомпозитные структуры." *Електроніка та зв'язок. Тематичний випуск "Електроніка та нанотехнології"* 1 (2011): 20-22.
84. Bondar, E. A., Y. A. Kulyupin, and N. N. Popovich. "The inverse problem of the phenomenological theory of the optical properties of thin films." *Thin Solid Films* 55.2 (1978): 201-209.
85. Мачуляньський, Олександр. *Наноструктурні металодіелектричні системи з прогнозованими електромагнітними характеристиками*. Дис. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.

86. Майссел, Л., и Р. Глэнг. *Технология тонких пленок*. Москва: Советское радио, 1977. 663 с.
87. McPeak, Kevin M., et al. "Plasmonic films can easily be better: rules and recipes." *ACS photonics* 2.3 (2015): 326-333.
88. Fedyanin, D. Y., et al. "Ultralow-loss CMOS copper plasmonic waveguides." *Nano Letters* 16.1 (2015): 362-366.
89. Platzman, I., et al. "Oxidation of polycrystalline copper thin films at ambient conditions." *The Journal of Physical Chemistry C* 112.4 (2008): 1101-1108.
90. Lai, Guozhong, et al. "Optical properties of the oxidation of Cu thin films prepared by thermal evaporation." *Surface Review and Letters* 20.01 (2013): 1350011.
91. Kreibig, Uwe, and Michael Vollmer. *Optical properties of metal clusters*. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 532 p.
92. Babych, B., et al. *Investigation of the structure and optical properties of thin copper films*, Proceedings of the IEEE 38th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 24-26 April 2018.
93. Yakimenko, Y., et al. *Broadband dielectric and conductivity spectra of dielectric-metal nanocomposites for microwave applications*, Proceedings of the IEEE 33rd International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 16-19 April 2013.
94. Монахов, И. С., и М. Г. Тюрганов. "Начальные стадии роста пленок вольфрама и меди при магнетронном распылении." *Московский государственный институт электроники и математики*: 1-5.
95. Lee, Yun Seog, et al. "Hall mobility of cuprous oxide thin films deposited by reactive direct-current magnetron sputtering." *Applied Physics Letters* 98.19 (2011): 192115.
96. Nalepka, Raymond, and Russell Huffer. "Multi-layer low emissivity thin film coating." U.S. Patent 4,883,721. 28 Nov. 1989.
97. Kittler, W. G. "Transparent conductive coating." PCT/VS90/01554. 19 Mar. 1990.

98. Oyama, Takuji, and Mamoru Mizuhashi. "Optical article having improved heat resistance." U.S. Patent 4,640,867. 3 Feb. 1987.
99. D'errico, John J. "Laminated glazing panel having improved resistance to light exposure." U.S. Patent 5,427,861. 27 Jun. 1995.
100. Мачулянский, А. В. "Моделирование ультрадисперсных металлодиэлектрических систем." *Электроника и связь* 9 (2000): 123-125.
101. Львовский, Е. Н. *Статистические методы построения эмпирических формул*. Москва: Высшая школа, 1982. 224 с.
102. Семендяев, К. А. *Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗ*. Рипол Классик, 2013. 614 с.
103. Machulianskyi, O., B. Babych, and V. Machulianskyi. "Optical filters on the basis of composite nanodimensional structures." *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка* 1.25 (2017): 34-37.
104. Yakimenko, Y., et al. *Electrophysical properties of nanocomposite materials on the base of structures metal-dielectric*, Proceedings of the 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology, Warsaw, 12-16 May 2010.
105. Rodionov, M. et al. *Film coatings that are transparent in the visible spectral region with shielding properties in the microwave range*, Proceedings of the IEEE 37th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 18-20 April 2017.
106. Machulianskyi O. V., B. B. Babych, and V. O. Machulianskyi. *Approximation models of functional systems with nanocomposite components*, Materials of 20th international conference of mathematical modelling, Kherson, 16-20 September 2019.
107. Machulianskyi, O. "Optical characteristics of nanodimensional particles of chrome." *Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences* 257.1 (2018): 203-207.
108. Johnson, P. B., and R. W. Christy. "Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd." *Physical Review B* 9.12 (1974): 5056-5070.

- 109.Золотухин, И. В., Ю. Е. Калинин, и А. В. Ситников. "Наноккомпозитные структуры на пути в наноэлектронику." *Природа* 1 (2006): 11-19.
- 110.Розенберг, Г. В. "Физические основы спектроскопии светорассеивающих веществ." *Успехи физических наук* 91.4 (1967): 569-608.
- 111.Петров, Ю. И. *Физика малых частиц*. Москва: Наука, 1982. 359 с.
- 112.Борен, К., и Д. Хафмен. *Поглощение и рассеяние света малыми частицами*. Москва: Мир, 1986. 664 с.
- 113.Machulianskyi, Oleksandr, Bohdan Babych, and Viktor Machulianskyi. "Determination of the efficiency factors of the absorption and scattering of nickel nanoparticles." *Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska* 8.1 (2018): 4-7.
- 114.Matheu, P., et al. "Metal and dielectric nanoparticle scattering for improved optical absorption in photovoltaic devices." *Applied physics letters* 93.11 (2008): 113108-1-113108-3.
- 115.Wu, S. T., and L. W. Masters. "A simple model for the numerical simulation of reflectance of black chrome coating systems." *Journal of Coatings Technology* 56.711 (1984): 29-32.
- 116.Агнихотри, О., и Б. Гупта. *Селективные поверхности солнечных установок*. Москва: Мир, 1984. 277 с.
- 117.Патент на корисну модель № 97514 Україна. Наноккомпозитні струкутури з заданими характеристиками для використання як багатофункціональних енергозберігаючих світлопрозорих покриттів / Борисова О. В., Мачулянський О. В., Родіонов М. К., Якименко Ю. І. // № u201406267. Опубл. 25.03.2015 р., бюл. № 6, МПК G02B 5/20 (2006.01).
- 118.Machulianskyi, O., B. Babych, and V. Machulianskyi. *Application of evolutionary algorithm for modeling and optimization of selective systems*, Proceedings of the 14th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 23-26 October 2018.
- 119.Machulianskyi, O., B. Babych, and V. Machulianskyi. "Optical filters on the basis of composite nanodimensional structures." *Вісник Київського*

- національного університету імені Тараса Шевченка. *Радіофізика та електроніка* 1.25 (2017): 34-37.
120. Еремеев, А. В. *Генетические алгоритмы и оптимизация. Учебное пособие.* Омск: ОмГУ, 2008. 48 с.
 121. Теличкина О. В., А. В. Мачулянский, и В. А. Мачулянский. *Анализ эффективности применения наноструктурных систем для защиты информации от утечки по техническим каналам*, Материалы 12-й Международной научно-технической конференции SAIT 2010, Киев, 25-29 мая 2010 г.
 122. Молчанов, В. И., и др. "Полупроводниковые структуры СВЧ с электронным управлением." *Техника и приборы СВЧ* 1 (2011): 29-30.
 123. Пилинский, В. В., и др. "Моделирование структур для информационных и телекоммуникационных систем." *Електроніка та зв'язок* 5 (2011): 82-85.
 124. Якименко, Ю. И., и др. *Защитные материалы СВЧ-диапазона на основе нанодисперсных структур металл-диэлектрик*, Материалы 6-й Международной научно-технической конференции "Современные информационно-коммуникационные технологии", Ливадия, 4-8 октября 2010 г.
 125. Yakimenko, Y., et al. *Nanocomposite materials on the base of polymer-carbon*, Proceedings of the 34th International Spring Seminar on Electronics Technology, Tatras, 11-15 May 2011.
 126. Wieckowski, T., et al. *Application of nanostructured materials ensuring the electromagnetic compatibility of power electronic*, Proceedings of the International Symposium EMC Europe 2010, Wroclaw, 13-17 September 2010.
 127. Мачуляньський, О. В., та ін. "Моделювання термометричної характеристики діодних сенсорів в умовах радіаційного опромінення." *Електроніка та зв'язок* 4 (2006): 5-8.

- 128.Теличкина, О. В., и др. "Диэлектрические характеристики композиционных материалов на основе углерода." *Електроніка та зв'язок. Тематичний випуск "Електроніка та нанотехнології"* 2 (2011): 39-41.
- 129.Татарчук, Д. Д., и др. "Влияние структуры и состава полимеруглеродных нанокомпозитов на их электромагнитные свойства." *Технічна електродинаміка* 1 (2011): 332-335
- 130.Бондарь, Б. М., и др. *Характеристики радиопоглощающих композитных покрытий на основе нанодисперсных частиц*, Материалы 22-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, 12-14 сентября 2012 г.
- 131.Кондратьев Д. Н., Журавский В. Г. "Использование наноструктурных материалов для повышения надежности РЭА" *Наноиндустрия* 4 (2008): 38-43.
- 132.Мачулянский, А. В., и др. "Перспективы применения наноструктурных материалов для электромагнитного экранирования." *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність"* 3 (2008): 39-42.
- 133.Борисова, А. В., и др. *Наноструктурные композитные металл-диэлектрические материалы для СВЧ-приборов*, Материалы 7-й Международной научно-технической конференции "Современные информационно-коммуникационные технологии", Ливадия, 4-8 октября 2011 г.
- 134.Якименко, Ю. И., и др. *Нанокомпозитные материалы полимер-углерод*, Материалы 21-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, 12-16 сентября 2011 г.
- 135.Ихсанов, Р. Ш., И. Е. Проценко, и А. В. Усков. "Повышение эффективности органических солнечных элементов с помощью

- плазмонных наночастиц." *Письма в Журнал технической физики* 39.10 (2013): 1-8.
- 136.Вербицкий , В. Г., и др. "Разработка металлодиэлектрических структур с энергосберегающими свойствами на основе алюминия." *Восточно-Европейский журнал передовых технологий* 6.9(72) (2014): 43-47
- 137.Гадомский, О. Н., и А. С. Шалин. "Эффект оптического просветления нанокристаллического монослоя и границы раздела двух сред." *Журнал экспериментальной и теоретической физики* 132.4 (2007): 870-894.
- 138.Window, B., I. Ritchie, and K. Cathro. "Selective electroplated chromium blacks." *Applied optics* 17.16 (1978): 2637-2644.

ДОДАТОК 1

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙ

1. Machulianskyi, Oleksandr, **Bohdan Babych**, and Viktor Machulianskyi. "Determination of the efficiency factors of the absorption and scattering of nickel nanoparticles." *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska* 8.1 (2018): 4-7.
(INDEX COPERNICUS, GOOGLE SCHOLAR, опубліковано у періодичному науковому виданні іншої держави, що входить до Організації економічного співробітництва та розвитку та Європейського Союзу)
(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)
2. Мачулянський, О. В., **Б. Б. Бабич**, В. О. Мачулянський, та Н. П. Тарасовська. "Моделювання наноструктурних металодіелектричних систем для використання в якості оптичних фільтрів." *Вісник Херсонського національного технічного університету* 1.3(58) (2016): 371-375.
(ФАХОВЕ ВИДАННЯ, НАЦІОНАЛЬНА БІБЛІОТЕКА ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО, GOOGLE SCHOLAR, РИНЦ)
(Особистий внесок здобувача: розроблено алгоритм розрахунку)
3. Мачулянський, А. В., **Б. Б. Бабыч**, и В. А. Мачулянський. "Математическое моделирование многофункциональных покрытий." *Вісник Херсонського національного технічного університету* 1.3(62) (2017): 192-196.
(ФАХОВЕ ВИДАННЯ, НАЦІОНАЛЬНА БІБЛІОТЕКА ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО, GOOGLE SCHOLAR, РИНЦ)
(Особистий внесок здобувача: проведено розрахунок параметрів просвітлюючих покриттів)
4. Machulianskyi, O. V., **B. B. Babych**, and V. O. Machulianskyi. "Modeling of an electromagnetic response of single-layer nanocomposite coatings." *Visnyk of Kherson National Technical University* 1.3(66) (2018): 104-108.
(ФАХОВЕ ВИДАННЯ, НАЦІОНАЛЬНА БІБЛІОТЕКА ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО, GOOGLE SCHOLAR, РИНЦ)
(Особистий внесок здобувача: проведено числове моделювання спектрів відбивання та пропускання композитів та аналіз отриманих результатів)
5. Machulianskyi, O. V., **B. B. Babych**, and V. O. Machulianskyi. "Approximation models of functional systems with nanocomposite components." *Visnyk of Kherson National Technical University* 3.2(69) (2019): 145-150.
(ФАХОВЕ ВИДАННЯ, НАЦІОНАЛЬНА БІБЛІОТЕКА ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО, GOOGLE SCHOLAR, РИНЦ)

(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)

6. Machulansky, A., and **B. Babych**. "Selective energy-saving metal-dielectric nanocomposite coatings based on copper." *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка* 1/2.21/22 (2014): 74-78.

(ФАХОБЕ ВИДАННЯ, GOOGLE SCHOLAR)

(Особистий внесок здобувача: розрахунок параметрів теплових фільтрів в інфрачервоному діапазоні)

7. Machulansky, A., and **B. Babych**. "Dielectric-metal composites with dispersed inclusions of copper for microwave range devices." *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка* 1.23 (2015): 55-57.

(ФАХОБЕ ВИДАННЯ, GOOGLE SCHOLAR)

(Особистий внесок здобувача: проведено числове моделювання ефективної діелектричної проникності нанокомпозитних матеріалів)

8. Machulianskyi, O., **B. Babych**, and V. Machulianskyi. "Optical filters on the basis of composite nanodimensional structures." *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка* 1.25 (2017): 34-37.

(ФАХОБЕ ВИДАННЯ, GOOGLE SCHOLAR)

(Особистий внесок здобувача: розрахунок параметрів теплових фільтрів в інфрачервоному діапазоні)

9. Borisova, A., A. Machulyansky, M. Rodionov, Y. Yakimenko, and **B. Babych**. *Properties of aluminum oxynitride films prepared by reactive magnetron sputtering*, Proceedings of the IEEE 34th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 16-19 April 2014.

(SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)

(Особистий внесок здобувача: дослідження оптичних властивостей діелектричних плівок)

10. Borisova, A., A. Machulyansky, M. Rodionov, V. Verbitskiy, Y. Yakimenko, and **B. Babych**. *Energy-efficient optically transparent coating based on a metal-dielectric composites*, Proceedings of the IEEE 35th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 21-24 April 2015.

(SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)

(Особистий внесок здобувача: проведено розрахунок параметрів просвітлюючих покриттів)

11. Borisova, A., **B. Babych**, A. Machulyansky, V. Verbitskiy, and Y. Yakimenko. *Dimensional dependencies of optical parameters of nanodimensional metal particles*, Proceedings of the IEEE 36th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 19-21 April 2016.
(SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)

12. **Babych, B.**, A. Borisova, A. Machulyansky, V. Machulyansky, M. Rodionov, and Y. Yakimenko. *Film coatings that are transparent in the visible spectral region with shielding properties in the microwave range*, Proceedings of the IEEE 37th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 18-20 April 2017.
(SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
(Особистий внесок здобувача: проведено розрахунок параметрів просвітлюючих покриттів)

13. **Babych, B.**, O. Borisova, O. Machulianskyi, M. Rodionov, V. Verbitskiy, and V. Machulianskyi; Y. Yakymenko. *Investigation of the structure and optical properties of thin copper films*, Proceedings of the IEEE 38th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 24-26 April 2018.
(SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)

14. **Babych, B.**, O. Borisova, O. Machulianskyi, M. Rodionov, D. Koroliouk, V. Machulianskyi, and Y. Yakymenko. *Applications of metal-dielectric nanocomposite structures in information systems*, Proceedings of the IEEE 38th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 24-26 April 2018.
(SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)

15. **Babych, B.**, Y. Yakymenko, M. Rodionov, O. Machulianskyi, and V. Seker. *Infrared spectra of metal-dielectric nanostructured phosphate class complexes*, Proceedings of the IEEE 39th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology", Kyiv, 16-18 April 2019.
(SCOPUS, WEB OF SCIENCE, GOOGLE SCHOLAR)
(Особистий внесок здобувача: дослідження оптичних властивостей діелектричних плівок)

16. **Babych, B.** *Magnetic Granular Materials*, Innovations in Science and Technology: proceeding of the XI International R&D Students Conference, Kyiv, 28 November 2013.

17. Мачулянський, О. В., та **Б. Б. Бабич.** *Оптичні характеристики нанодисперсних металодіелектричних плівок*, Матеріали 8-ї науково-практичної конференції "Перспективні напрямки сучасної електроніки", Київ, 14-15 травня 2014 р.
(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)

18. Секер, В. П., и **Б. Б. Бабыч.** *Спектры поглощения и отражения наноккомпозитных структур на основе серебра*, Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених "ЕЛЕКТРОНІКА-2017" (ELCONF), Київ, 25-27 квітня 2017 р.
(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)

19. Machulyansky, A., and **B. Babych.** *Energy-saving nanocomposite coverings on the basis of copper*, Proceedings of the 10th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 22-25 October 2014.
(Особистий внесок здобувача: розрахунок параметрів теплових фільтрів в інфрачервоному діапазоні)

20. Machulyansky, A., and **B. Babych.** *Dielectric-metal composites with dispersed inclusions of copper for microwave applications*, Proceedings of the 11th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 21-24 October 2015.
(Особистий внесок здобувача: розраховано електричні параметри наноккомпозитних елементів)

21. Machulyansky, A., **B. Babych**, and V. Machulyansky. *Cutting filters based on composite nanoscale structure*, Proceedings of the 12th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 19-21 October 2016.
(Особистий внесок здобувача: проведено числове моделювання ефективної діелектричної проникності наноккомпозитних матеріалів)

22. Machulyansky, A., **B. Babych**, and V. Machulyansky. *Optical filters on the basis of composite systems with nanodimensional inclusions of metals*, Proceedings of the 13th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 24-27 October 2017.
(Особистий внесок здобувача: розрахунок параметрів теплових фільтрів в інфрачервоному діапазоні)

23. Machulianskyi, O., **B. Babych**, and V. Machulianskyi. *Application of evolutionary algorithm for modeling and optimization of selective systems*, Proceedings of the 14th International Conference "Electronics and applied physics", Kyiv, 23-26 October 2018.
(Особистий внесок здобувача: проведено оптимізацію параметрів селективних елементів та аналіз отриманих результатів)

24. Борисова, О. В., **Б. Б. Бабич**, В. Г. Вербицький, О. В. Мачулянський, и В. О. Смілик. *Енергозберігаючі наноккомпозитні покриття на основі нікелю*, Матеріали 4-ї Міжнародної науково-практичної конференції "Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки", Чернівці, 23-25 жовтня 2014 р.
(Особистий внесок здобувача: розрахунок параметрів теплових фільтрів в інфрачервоному діапазоні)

25. Мачулянський, О. В., **Б. Б. Бабич**, та В. О. Мачулянський. *Електродинамічне моделювання композитів на основі діелектричної матриці з включеннями феромагнітних металів*, Матеріали 5-ї Міжнародної науково-практичної конференції "Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах", Чернівці, 3-5 листопада 2016 р.
(Особистий внесок здобувача: розроблено алгоритм розрахунку)

26. Мачулянський, О. В., **Б. Б. Бабич**, та В. О. Мачулянський. *Визначення факторів ефективності поглинання та розсіювання наночастинок нікелю*, Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції I Міжнародний симпозіум "Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях", Чернівці, 9-11 листопада 2017 р.
(Особистий внесок здобувача: розраховано оптичні параметри нанорозмірних плівок металів)

27. Мачулянський, О. В., **Б. Б. Бабич**, та В. О. Мачулянський. *Селективні властивості наноккомпозитних металодіелектричних структур в оптичному діапазоні*, Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції "Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах", Чернівці, 8-10 листопада, 2018.
(Особистий внесок здобувача: розраховано електричні параметри наноккомпозитних елементів)

28. Мачулянский, А. В., **Б. Б. Бабыч**, и В. А. Мачулянський. *Математическое моделирование многофункциональных покрытий*, Матеріали 18-ї Міжнародної конференції з математичного моделювання, Херсон, 18-22 вересня 2017 р.

(Особистий внесок здобувача: проведено розрахунок параметрів просвітлюючих покриттів)

29. Machulianskyi, O. V., **B. B. Babych**, and V. O. Machulianskyi. *Modeling of an electromagnetic response of single-layer nanocomposite coatings*, Materials of 19th international conference of mathematical modelling is dedicated to 250 anniversary from the birthday Jean-Baptiste Joseph Fourier, Kherson, 17-21 September 2018.

(Особистий внесок здобувача: проведено числове моделювання спектрів відбивання та пропускання композитів та аналіз отриманих результатів)

30. Machulianskyi O. V., **B. B. Babych**, and V. O. Machulianskyi. *Approximation models of functional systems with nanocomposite components*, Materials of 20th international conference of mathematical modelling, Kherson, 16-20 September 2019.

(Особистий внесок здобувача: розраховано електричні параметри нанокompозитних елементів)

31. Machulyansky, A., **B. Babych**, and V. Machulyansky. *Modelling of electromagnetic parameters of two-dimensional nanostructural system taking into account statistics of distribution of nanoparticles on the sizes*, Матеріали 9-ї Міжнародної наукової конференції "Функциональная база наноэлектроники", Одеса, 18-23 вересня 2017.

(Особистий внесок здобувача: розраховано електричні параметри нанокompозитних елементів)

32. Мачулянський, О. В., **Б. Б. Бабич**, та В. П. Секер. *Просвітлюючі покриття на основі наноструктурних металодіелектричних композитів*, Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції "Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка", Кременчук, 17-19 травня 2018 р.

(Особистий внесок здобувача: проведено розрахунок параметрів просвітлюючих покриттів)

ДОДАТОК 2

ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні положення і результати роботи доповідались та обговорювались на:

- XI міжнародній науково-практичній студентській конференції “Innovations in Science and Technology” (м. Київ, 2013 р.);
- X, XI, XII, XIII, XIV міжнародній науково-технічній конференції “Electronics and applied physics” (м. Київ, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 рр.);
- 34th, 35th, 36th, 37th, 38th, 39th міжнародній науково-технічній конференції “Electronics and Nanotechnology (ELNANO)” (м. Київ, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 рр.);
- IV міжнародній науково-технічній конференції “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки” (м. Чернівці, 2014 р.);
- VIII науково-практичній конференції “Перспективні напрямки сучасної електроніки” (м. Київ, 2014 р.);
- V міжнародній науково-технічній конференції “Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems” (м. Чернівці, 2016 р.);
- XVII, XVIII, XIX, XX міжнародній конференції з математичного моделювання (МКММ) (м. Херсон, 2016, 2017, 2018, 2019 рр.);
- X міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених “ЕЛЕКТРОНІКА-2017” (ELCONF) (м. Київ, 2017 р.);
- IX міжнародній науковій конференції “Функциональная база наноэлектроники” (м. Одеса, 2017 р.);
- VI міжнародній науково-практичній конференції I Міжнародний симпозіум “Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях” (Чернівці, 2017 р.);
- VII міжнародній науково-практичній конференції “Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах” (Чернівці, 2018 р.);
- V міжнародній науково-практичній конференції “Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка”, (Кременчук, 2018 р.).

ДОДАТОК 3

ДОКУМЕНТИ ПРО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з наукової роботи
Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Георгія Сікорського»

В.А. Пасічник
10 2019 р.



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Бабича Богдана Борисовича
на тему «Оптично селективні пристрої на основі нанокompозитних структур»
при виконанні науково-дослідної роботи «Функціональні пристрої на основі
композитних наноструктур»

Комісія у складі голови в. о. зав. кафедри мікроелектроніки к.т.н., проф.
Борисова О.В. та членів к.ф.-м.н., проф. Родіонова М.К., к.т.н., доц.
Коваль В.М. склала даний акт про те, що результати дисертаційної роботи
Бабича Б.Б., а саме:

- розроблені алгоритми визначення оптичних параметрів дисперсійних металічних частинок;
- результати дослідження взаємозв'язку між оптичними характеристиками покриттів та їх структурними морфологічними параметрами.

використані при виконанні НДР «Функціональні пристрої на основі
композитних наноструктур» (№ державної реєстрації 0116U008156).

Голова комісії
В. о. завідувача кафедри мікроелектроніки
к.т.н., проф.



О.В. Борисов

Члени комісії:

к.ф.-м.н., проф.



М.К. Родіонов

к.т.н., доц.



В.М. Коваль

"ЗАТВЕРДЖУЮ"



Директор з наукової роботи
Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

В.А. Пасічник

10 2019 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Бабича Богдана Борисовича
на тему «Оптично селективні пристрої на основі нанокомпозитних структур»
при виконанні науково-дослідної роботи «Електронні властивості та елементи
симетрії нанорозмірних твердих тіл»

Комісія у складі голови зав. кафедри мікроелектроніки к.т.н., проф.
Борисова О.В. та членів к.ф.-м.н., проф. Родіонова М.К., к.т.н., доц.
Коваль В.М. склала даний акт про те, що результати дисертаційних досліджень
Бабича Б.Б., присвячені дослідженню електромагнітних властивостей
композитних систем на основі нанорозмірних компонент, а саме дослідження:

- взаємозв'язку електромагнітних параметрів з відгуком наноструктурної системи в оптичному діапазоні спектру;
- змін оптичних властивостей наноструктурних систем, які обумовленні порушенням їх симетрії.

використані при виконанні НДР «Електронні властивості та елементи симетрії
нанорозмірних твердих тіл» (№ державної реєстрації 0118U001522).

Голова комісії

В. о. завідувача кафедри мікроелектроніки
к.т.н., проф.

О.В. Борисов

Члени комісії:

к.ф.-м.н., проф.

М.К. Родіонов

к.т.н., доц.

В.М. Коваль

"ЗАТВЕРДЖУЮ"



Перший проректор
Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Ю.І. Якименко
В.Р. Холмєко
"05" "09" 2019 р.

АКТ

про використання у навчальному процесі кафедри мікроелектроніки
Національного технічного університету України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського» результатів, одержаних при виконанні
дисертаційної роботи Бабича Богдана Борисовича на тему «Оптично селективні
пристрої на основі нанокompозитних структур»

Комісія у складі голови в. о. зав. кафедри мікроелектроніки к.т.н., проф.
Борисова О.В. та членів к.ф.-м.н., проф. Родіонова М.К., к.т.н., доц.
Коваль В.М. склала даний акт про те, що наукові розробки та результати
дисертаційної роботи аспіранта кафедри мікроелектроніки Бабича Б.Б.,
використані у навчальному процесі кафедри мікроелектроніки, а саме
використовуються в лекційних і практичних заняттях з дисциплін
«Твердотільна електроніка», «Технологічні основи електроніки», «Технологія
напівпровідникових приладів та інтегральних схем», «Елементний і
структурний аналіз», а також під час виконання кваліфікаційних робіт
студентів кафедри.

Голова комісії
В. о. завідувача кафедри мікроелектроніки
к.т.н., проф.

О.В. Борисов

Члени комісії:

к.ф.-м.н., проф.

М.К. Родіонов

к.т.н., доц.

В.М. Коваль